

Қазақстан Республикасының ғылым және жоғары білім министрлігі

«Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және
байланыс университеті»
коммерциялық емес акционерлік қоғамы

Ж.Ж. Тойгожинова
Н.И. Даримбаева

АВТОМАТТАНДЫРЫЛҒАН ЖҮЙЕЛЕРДІҢ ЭЛЕКТР МАШИНАЛАРЫ

Оқу құралы

Алматы 2026

ӘОЖ 621.313
КБЖ 31.26

Пікір берушілер:
PhD ҚазҰАЗУ, «Энергия үнемдеу және автоматика» кафедрасының
меңгерушісі
А.К. Молдажанов,
К.И. Сатпаев атындағы ҚазҰТУ, «Автоматтандыру және басқару»
кафедрасының доценті
Н.С. Сарсенбаев,
Ғұмарбек Дәукеев атындағы АЭЖБУ, қауымдастырылған проф, PhD
С.Қ.Абильдинова

Алматы энергетика және байланыс университетінің Ғылыми кеңесі басуға
ұсынды (26.02. 2026 ж. №9 хаттама). АЭЖБУ 2026ж. ведомстволық әдебиетті
шығарудың 2026 жылға арналған тақырыптық жоспары бойынша басып
шығарылады, реті- 62.

Даримбаева Н.И., Тойгожинова Ж.Ж.

Д18 Автоматтандырылған жүйелердің электр машиналары. Оқу құралы
(жоғарғы оқу орындарының «6В07124 – Автоматтандырылған
электромеханикалық жүйелер» білім беру бағдарламасының студенттеріне
арналған)/ Н.И. Даримбаева, Ж.Ж. Тойгожинова. – Алматы: АЭЖБУ, 2026. –
109 бет.: суреттер 53, әдебиеттер тізімі – 9 атау.

ISBN 978-601-358-110-1

Ұсынылған оқу құралында төменгі қуатты электр машиналарының
теориясы, олардың құрылымы, жұмыс принципі және сипаттамалары
қарастырылған. Сонымен бірге әртүрлі типтегі электрлік микромашиналар
теориясының принципі кеңінен қарастырылған: күштік, атқарушы және
ақпараттық. Материалды ұсыну кезінде симметриялы құрылым әдісі кеңінен
қолданылады. Оқу құралы автоматика жүйелерінің машиналарын жасаумен
айналысатын мамандар үшін теориялық және тәжірибелік қызығушылық
тудыруы мүмкін.

Оқу құралы «6В07124 – Автоматтандырылған электромеханикалық
жүйелер» білім беру бағдарламасы бойынша оқитын студенттерге арналған.

ӘОЖ 621.313
КБЖ 31.26

ISBN 978-601-358-110-1

© АЭЖБУ, 2026
Тойгожинова Ж.Ж.
Даримбаева Н.И.2026

Мазмұны

Кіріспе.....	5
1 Автоматты құрылғылардың асинхронды микроқозғалтқыштары..	6
1.1 Екі фазалы асимметриялық асинхронды қозғалтқыштар теориясының негіздері	6
1.1.1 Екі фазалы асимметриялық машинада айналмалы өрісті алу шарттары.....	8
1.1.2 Екі фазалы асимметриялық асинхронды қозғалтқыштардың жұмысын талдауға қатысты симметриялық құрылымдар әдісі.....	12
1.1.3 Екі фазалы асимметриялық қозғалтқыштың энергетикалық диаграммасы және айналу моменті.....	14
1.2 Бір фазалы асинхронды микроқозғалтқыштар	16
1.2.1 Іске қосу кедергісі бар бір фазалы асинхронды қозғалтқыш.....	16
1.2.2 Іске қосу конденсаторы бар бір фазалы асинхронды қозғалтқыш.....	20
1.2.3 Асинхронды конденсаторлы қозғалтқыш.....	22
1.2.4 Экрандалған полюстері бар бір фазалы асинхронды қозғалтқыш.....	28
1.2.5 Бір фазалы желімен жұмыс істеу үшін үш фазалы асинхронды қозғалтқышты пайдалану. Әмбебап асинхронды қозғалтқыш.....	30
1.3 Асинхронды атқарушы қозғалтқыштар.....	34
1.3.1 Атқарушы микроқозғалтқыштар туралы жалпы мәліметтер.....	34
1.3.2 Асинхронды атқарушы қозғалтқыштар құрылғысының ерекшеліктері. Механикалық сипаттамасы.....	35
1.3.3 Қосылу сұлбалары және басқару әдістері.....	37
1.3.4 Амплитудалық басқарылатын асинхронды атқарушы қозғалтқыш	39
1.3.5 Фазалық басқарылатын асинхронды атқарушы қозғалтқыш	43
1.3.6 Конденсаторлық асинхронды атқарушы қозғалтқыш	44
2 Айнымалы және тұрақты токты тахогенераторлар.....	47
2.1 Асинхронды қуыс роторлы тахогенератор құрылысы және жұмыс принципі.....	47
2.1.1 Айнымалы ток тахогенераторының шықпалық сипаттамасы.....	49
2.2 Тұрақты ток тахогенераторлардың түрлері.....	51
2.2.1 Тұрақты ток тахогенераторлардың шықпалық сипаттамасы.....	52
2.3 Синхронды тахогенератор.....	53
3 Синхронды байланыстың индукциялық жүйесінің микромашиналары.....	54
3.1 Тағайындалуы, қасиеттері және қолданылу аймақтары.....	54
3.2 Сельсиндердің индикаторлық жұмыс режимдері.....	58
3.3 Сельсиндердің трансформаторлық жұмыс режимі.....	59

4	Айналмалы трансформаторлар, олардың тағайындалуы және жұмыс істеу принципі.....	61
4.1	Айналмалы трансформатордың құрылысы	61
4.2	Синусты айналмалы трансформатор.....	63
4.3	Айналмалы құрушы трансформатор	67
5	Синхронды микроқозғалтқыштар.....	69
5.1	Тұрақты магниттермен қоздырылатын синхронды микроқозғалтқыштар.....	69
5.2	Синхронды реактивті қозғалтқыш анықтамасы және жұмыс істеу принципі.....	71
5.3	Синхронды гистерезистік микроқозғалтқыштарының құрылысы және жұмыс істеу принципі.....	73
5.4	Қажамдық қозғалтқыштар.....	75
5.4.1	Активті ротордан тұратын қадамдық қозғалтқыш.....	75
5.4.2	Реактивті қадамдық қозғалтқыш.....	78
6	Коллекторлы микроқозғалтқыштар.....	80
6.1	Жалпы түсініктемелері.....	80
6.2	Атқарушы тұрақты ток қозғалтқыштары.....	82
6.2.1	Зәкірмен басқарылатын тұрақты ток қозғалтқыштары.....	82
6.2.2	Полюсті басқарылатын тұрақты ток қозғалтқыштары.....	86
6.3	Тұрақты магниттермен қоздырылатын тұрақты токты атқарушы қозғалтқыштары.....	89
6.4	Төменгі инерциалы тұрақты токты қозғалтқыштар.....	91
6.4.1	Басылған зәкір орамасынан тұратын төменгі инерциялы қозғалтқыштар.....	91
6.4.2	Әдеттегі зәкір орамасынан тұратын төменгі инерциялы тұрақты ток қозғалтқыштары.....	93
6.4.3	Тегіс зікірден тұратын атқарушы тұрақты токты қозғалтқыш.....	94
6.5	Әмбебап коллекторлы қозғалтқыштар.....	95
7	Вентильді тұрақты токты қозғалтқыш.....	100
7.1	Вентильді тұрақты токты қозғалтқыштың құрылысы.....	101
7.2	Вентильді тұрақты токты қозғалтқыштың жұмыс принципі.....	100
7.3	Екі жартылай периодты үш бөліктен тұратын вентильді қозғалтқыш.....	105
	Әдебиеттер тізімі.....	109

Кіріспе

Қазіргі уақытта автоматты басқару жүйелерінің қарқынды дамуының арқасында техниканың дамуы және жұмыс өнімділігі артуда. Бұл адамның көптеген техникалардағы басқарудың әлі де күрделі мақсаттарын шешуге қабілеттігін туғызады.

Сондықтан, автоматтандыру жүйелерінің негізгі элементі болып табылатын электрлік микромашиналары туралы оқуға және тәжірибеде қолдануға деген үлкен қызығушылық туады.

Қазіргі кезде тұрақты жиіліктен тұратын индукционды микромашиналарды (сельсиндерді) және жиілікті түрлендіргіштерді қолданылатын жүйелер кеңінен қолданылады.

Қолданылу сипаты бойынша автоматты басқару жүйелеріндегі электрлік микромашиналар келесі топтарға бөлінеді:

- атқарушы қозғалтқыштар;
- тахогенераторлар;
- айналмалы трансформаторлар;
- синхронды байланысты машиналар және т.б.

Бұл микромашиналар айнымалы және тұрақты тоқты болып келеді.

Соңғы уақытта басқарудың тез әсер етуін және дәлдігін жоғарлататын сандық жүйелер, әртүрлі технологиялық үдерістерді автоматтандыру үшін олар кең қолданылады. Сонымен қатар қадамдық қозғалтқышты қолдану арқылы сандық бағдарламалық басқару жүйесі де кең қолданылады. Осылардың салдарынан технологиялық үдерістің сапасы мен өнімділігі едауір жоғарлайды.

Сондықтан аталған жүйені жасайтын және жобалайтын маман иелері қажетті машинаның түрін дұрыс таңдауды және оған сәйкес келетін тасымалдау режимін орнату үшін оның құрылысын, жұмыс істеу принципін, жұмыс жасау ерекшеліктерін және электр машиналарының негізі түрлерінің сипаттамаларын жақсы білуі тиіс.

Оқу құралында қазіргі уақыттағы автоматтандыру жүйелерінің негізгі элементі ретінде пайдаланылатын микромашинаның негізгі түрлері қарастырылған.

Оқу құралын оқу АЭЖБУ-ң энергиямен қамтамасыз ету және электр жетегі кафедрасында оқытылатын «Автоматтандырылған жүйелерінің электр машиналары» курсының дәрісіне негізделген.

1 Автоматты құрылғылардың асинхронды микроқозғалтқыштары

1.1 Екі фазалы асимметриялық асинхронды қозғалтқыштар теориясының негіздері

Автоматика сұлбаларында асинхронды микроқозғалтқыштар (АМК) атқарушы және күштік қозғалтқыштар ретінде қолданылады. Жалпы қолданылатын АМК үш фазалы және бір фазалы болуы мүмкін. Бір фазалы АМК көп қолданысқа ие, өйткені автоматика тізбектерінің көпшілігінде бір фазалы айнымалы ток қолданылады. Олар бір фазалы желімен қоректенетіндіктен бір фазалы қозғалтқыштар деп аталады, оның статорында кеңістікте екі жылжымалы орамалары бар. Сондықтан, құрылысы бойынша олар жалпы жағдайда асимметриялық екі фазалы қозғалтқыштар болып табылады.

Бұл бөлімде біз екі фазалы асимметриялы асинхронды қозғалтқыштар теориясының негіздеріне олардың жұмыс принциптерін және екі фазаны пайдаланатын қозғалтқыш конструкцияларының ерекшеліктерін зерттеуді, сондай-ақ олардың асимметриялық сипаттамаларын талдаймыз.

Екі фазалы асинхронды қозғалтқыш-бұл екі фазалы қорек көзі қолданылатын электр қозғалтқышы. Мұндай қозғалтқыштар көбінесе үш фазалы қуат қол жетімді емес немесе экономикалық тұрғыдан мүмкін емес жағдайларда қолданылады.

Асимметриялық қозғалтқыш-бұл қорек көзінің фазалары біркелкі емес кернеуге немесе токтарға ие, нәтижесінде теңгерімсіз жұмыс жағдайлары пайда болатын қозғалтқыш түрі.

Екі фазалы асинхронды қозғалтқыштың жұмыс принципі үш фазалы асинхронды қозғалтқыш сияқты, екі фазалы қозғалтқышта ротордағы токты индукциялайтын айналмалы магнит өрісі пайда болады. Бірақ, екі фазалы тізбектің арқасында магнит өрісі белгілі бір пішінге ие және симметриялы емес болады.

Электр өрісі статор орамасына қосылатын екі фазаның көмегімен жасалады. Осы екі фаза шығаратын магнит өрісі айналмалы және роторда момент тудырады. Алайда, үшінші фазаның болмауына байланысты өріс кейбір ығысуларға ие болады және үш фазалы қозғалтқыштардағыдай біркелкі өзгермейді.

Екі фазалы қозғалтқыштардағы асимметрияны айтатын болсақ, екі фазалы қорек жағдайында асимметриялық токтар мен кернеулер пайда болуы мүмкін, бұл тиімділіктің жоғалуына және жұмыс сипаттамаларының төмендеуіне әкеледі.

Асимметрия келесі жағдайларға байланысты болуы мүмкін:

- кернеу бойынша: әр түрлі фазалардағы кернеу бірдей болмаған кезде (мысалы, дұрыс қосылмағандықтан).

- ток бойынша: фазалық токтар да әртүрлі болған кезде, бұл қосымша энергия шығыны мен қызып кетуіне әкелуі мүмкін.

- жиілік бойынша: қорек көздері дұрыс жұмыс істемесе, айнымалы ток жиілігі ауытқуы мүмкін, бұл қозғалтқыштың жұмысын бұзады.

Атқарушы (басқарылатын) асинхронды қозғалтқыштар екі фазалы болып табылады, олар жалпы жағдайда асимметриялық режимде жұмыс істейді, яғни, дөңгелек емес, эллиптикалық айналу өрісінде жұмыс істейді.

Екі фазалы асинхронды қозғалтқыштың асимметриялық жұмыс режимі екі себепке байланысты болуы мүмкін: а) құрылымы симметриялы емес; б) қоректенуі симметриялы емес.

Екі фазалы асинхронды машинасы, егер оның статорында орналасқан А және В орамдары келесідей жағдайларға сәйкес келсе симметриялы болып саналады:

- 1) Кеңістікте $\theta = 90$ электрондық градусқа ығысқан болса;
- 2) Бірдей тиімді тармақтар санына ие болса, $W_a = W_b$.
- 3) Бірдей орам коэффициенттерінен тұратын болса, $k_{Aор}W_A = k_{Bор}W_B$, мұндағы $k_{Aор}$ және $k_{Bор}$ – орам коэффициенттері, W_A және W_B – орам тармақтарының нақты саны;
- 4) Бірдей пазалар санынан тұрса ($N_{ZA} = N_{ZB}$);
- 5) Бірдей толық, активті, индуктивті кедергілерден тұрса ($Z_A = Z_B$, $r_a = r_b$, $x_a = x_b$).

Егер аталған шарттардың кем дегенде біреуі орындалмаса машина орындалуы бойынша симметриялы емес болып саналады.

Егер тек симметриялы қуат кезінде, кернеу орамаларының қысқыштарына жеткізілетін кернеулер симметриялы екі фазалы жүйені құрайтын болса симметриялы екі фазалы асинхронды қозғалтқыш симметриялы режимде болады. Сонымен қатар симметриялы екі фазалы кернеу жүйесі дегеніміз екі U_a және U_b кернеуінен тұратын, кернеуі бір біріне тең ($U_a = U_b$) қолданыстағы мәннен тұратын және фаза бойынша уақыттың төрт периодына ығысқан жүйені айтады. Егер U_a және U_b кернеулері бір біріне тең болмаса, немесе уақыт бойынша фазаның ығысуы 90 эл. градустан өзгеше болса, онда екі фазалы кернеу жүйесі симметриялы емес.

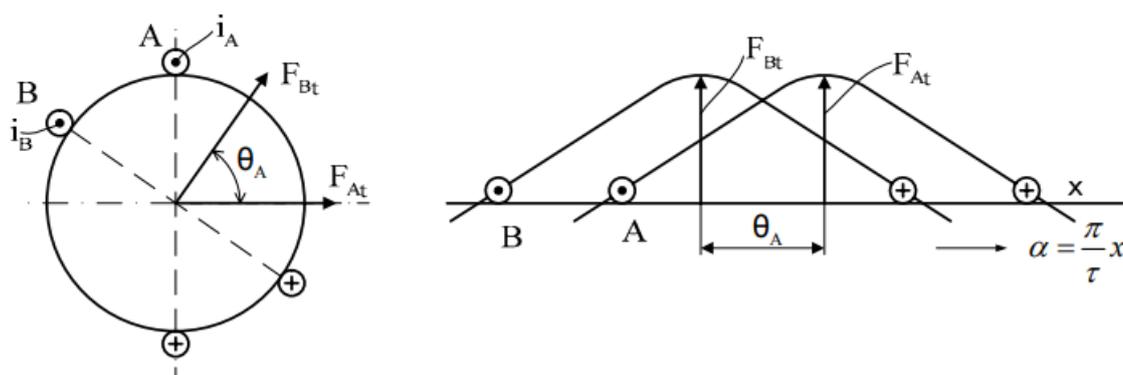
Құрылымы симметриялы емес екі фазалы асинхронды қозғалтқышты симметриялы қоректендіргенде ол симметриялы емес режимде жұмыс істейді, онда орамалардың (фазалардың) токтары асимметриялық екі фазалы ток жүйесін құрайды және ауа саңылауындағы магнит өрісі айналмалы магнит өрісінмен ерекшеленеді. Екінші жағынан, егер симметриялы асинхронды қозғалтқышты асимметриялық кернеу жүйесімен қоректендірсе, онда ол асимметриялық режимде болады.

Екі фазалы асинхронды қозғалтқыштың жұмысын талдауда екі фазалы айналмалы магнит өрісі үшін теңдеулер жүйесі қолдану, оны әртүрлі фазалардағы токтар мен кернеулерді білдіретін күрделі шамалар арқылы сипаттауды математикалық сипаттамасы ретінде қарастырамыз. Модельдер көбінесе өрістің теңгерімсіздігінен туындайтын асимметрия мен энергия шығынын ескереді. Осылайша, екі фазалы асинхронды асинхронды қозғалтқыштар зерттеу үшін маңызды объект болып табылады, әсіресе

шектеулі қорек көздерін пайдалану қажет болған жағдайда, бірақ олар тиімді жұмыс істеуді қамтамасыз ету үшін мұқият баптауды және жұмысты оңтайландыруды қажет етеді.

1.1.1 Екі фазалы асимметриялық машинада айналмалы өрісті алу шарттары

Екі фазалы асимметриялық машинаның жалпы жағдайын қарастырамыз, оның А және В статор орамалары кеңістікте θ_A бұрышына ығысқан және бірдей емес тиімді тармақтар санынан тұрады ($k_{Aop} W_A \neq k_{Bop} W_B$).



1.1 сурет – Асинхронды машинаның жалпы жағдайы

Симметриялы емес екі фазалы жүйенің орамның қысқыштарына кенеу беріледі және ол арқылы токтар өтеді:

$$i_A = \sqrt{2}I_A \sin \omega t, i_B = \sqrt{2}I_B \sin (\omega t + \beta), \quad (1.1)$$

Бұл токтар симметриялы емес екі фазалы жүйені құрайды (1.1, а сурет). i_A және i_B токтары уақытқа тәуелді пульсациялық және синусоидалы кеңістікте таратылатын ЭҚК ағымдарын тудырады (1.1, б сурет):

$$F_{Atx} = F_A \sin \omega t \cdot \cos \frac{\pi}{\tau} x = F_{At} \cos \cdot \cos \frac{\pi}{\tau} x; \quad (1.2)$$

$$F_{Btx} = F_B \sin(\omega t + \beta) \cdot \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x + \theta \right) = F_{Bt} \cos \cdot \left(\frac{\pi}{\tau} x + \theta_A \right).$$

мұндағы F_{At} және F_{Bt} – ЭҚК-тің лездік амплитудасы:

$$F_{At} = F_A \sin \omega t, F_{Bt} = F_B \sin(\omega t + \beta); \quad (1.3)$$

τ – полюстік бөлгіш; p – полюстер жұбының саны.

ЭҚК-тің импульстік толқындарының әрқайсысы бірдей жылдамдықпен қарама-қарсы бағытта айналатын импульстік толқынның максималды

амплитудасының жартысына тең амплитудасы бар екі толқын түрінде қарастырылуы мүмкін:

$$\begin{aligned} F_{Atx} &= \frac{1}{2} F_A \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x\right) + \frac{1}{2} F_A \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x\right); \\ F_{Btx} &= \frac{1}{2} F_B \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x + \beta - \theta_A\right) + \frac{1}{2} F_B \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x + \beta + \theta_A\right). \end{aligned} \quad (1.4)$$

Екі ораммен құрылатын нәтижелік ЭҚК:

$$F_{ABtx} = \frac{1}{2} [F_A \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x\right) + F_B \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x + \beta - \theta_A\right)] + \frac{1}{2} [F_A \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x\right) + F_B \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x + \beta + \theta_A\right)] = F' + F''; \quad (1.5)$$

мұндағы $F' = \frac{1}{2} [F_A \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x\right) + F_B \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x + \beta - \theta_A\right)]$ – ЭҚК-тің түзу бағытта айналатын толқыны;

$F'' = \frac{1}{2} [F_A \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x\right) + F_B \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x + \beta - \theta_A\right)]$ – ЭҚК-тің кері бағытта айналатын толқыны;

Осылайша, алынған нәтижелік ЭҚК-тің 1-ші гармоникасы бірдей жылдамдықпен, қарама-қарсы бағытта түзу және кері айналатын екі толқынның қосындысына тең болады.

F' және F'' ЭҚК-ін кеңістіктегі векторлар ретінде кесте түрінде бейнелеуге болады, олар $\Omega_1 = \frac{\omega}{p}$ бұрыштық жылдамдықпен қарама-қарсы бағытта айналады, мұндағы ω – желінің бұрыштық жылдамдығы. Кез-келген уақытта аталған векторлардың геометриялық қосылуы нәтижесінде алынған ЭҚК векторын анықтайды. Оның бір өзгеру кезеңіндегі соңы ЭҚК эллипсті сипаттайды, сондықтан мұндай ЭҚК эллиптикалық деп аталады, ал ол жасаған айналмалы өріс эллиптикалық өріс деп аталады. Бұл жағдайда машинаның магниттік жүйесі қанықпаған және ауалық саңылауы біркелкі болады деп болжанады.

Айналмалы магнит өрісі айналмалы болады, егер тік немесе кері айналатын ЭҚК нөлге тең болса. Демек, айналмалы өрісті алу шарттарын анықтау үшін, мысалы, айналмалы ЭҚК-ті нөлге теңестіру керек (кері тізбектің ЭҚК-і). Бұл ЭҚК теңдеуінен, егер $F_A = F_B = F_\Phi$ және $\beta + \theta_A = 180^\circ$ болса, $F'' = 0$. Сонымен қатар тік айналатын ЭҚК түрленгеннен кейін және $\beta = 180^\circ - \theta_A$ болғанда:

$$F' = F_\Phi \sin\theta_A \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x\right). \quad (1.6)$$

Егер $\theta_A = 90$ эл.рад. тең болса, дөңгелек айналмалы өріс максималды болады. Бұл жағдайда $\beta = 90^\circ$. Бұл жағдай іс жүзінде екі фазалы машиналардың статор орамдарының кеңістіктегі $\theta=90$ эл.град. бұрышқа

жылжуға ұмтылуының себебі болып табылады, ал олардағы ток $\beta = 90^\circ$ бұрышына ығысады. Екі фазалы машинада орамалары 90 электрондық градус кеңістікте жылжытылған дөңгелек айналмалы өрісті алу үшін орамалардың ЭҚК шамасы бойынша тең болуы қажет және уақыт бойынша төрттен бір бөлігіне тең болуы керек:

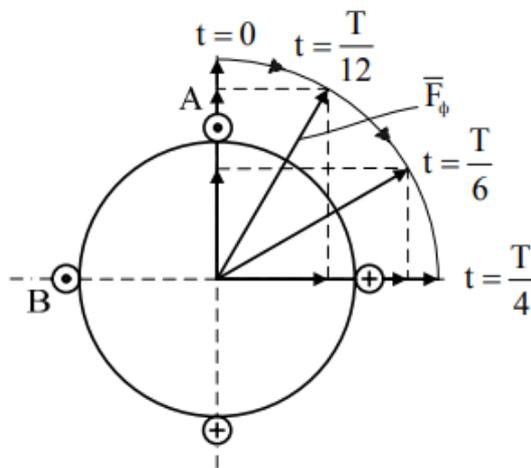
$$F_A = F_B = F_\phi \quad \text{және} \quad \beta = 90^\circ. \quad (1.7)$$

Бұл жағдайда А және В орамдарының нәтижелік ЭҚК-і дөңгелек тәрізді болады:

$$F_{ABtx} = F_\phi \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x\right). \quad (1.8)$$

Жоғарыда айтылғандардың көрінісі 1.2 суретте көрсетілген, онда орамалардың ЭҚК-ің лездік амплитудасының геометриялық қосындысы уақыттың әр түрлі моменттеріне сәйкес келетін тұрақты кеңістіктік векторды береді, ол белгілі бір бағытта айналады және оның ұшымен шеңберді сипаттайды:

$$F_{At} = F_A \sin \omega t, \quad \text{және} \quad F_{Bt} = F_B \sin(\omega t + 90^\circ), \quad (1.9)$$



1.2 сурет - Өзара перпендикуляр орамалары бар дөңгелек айналмалы өрісті қалыптастыру

Егер, мысалы $F_A > F_B$, онда тік және кері айналатын ЭҚК пайда болады және нәтижелік ЭҚК:

$$F_{ABtx} = F' + F'' = \frac{1}{2}(F_A + F_B) \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x\right) + \frac{1}{2}(F_A - F_B) \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x\right) = F_1 \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x\right) + F_2 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x\right). \quad (1.10)$$

Алынған ЭҚК векторының соңы бұл жағдайда эллипсті сипаттайды және ол жасаған магнит өрісі эллиптикалық болады (1.3 сурет).

А және В орамалары кеңістікте $\theta = 90^\circ$ эллектронды градусқа ығысқан және ойықтар саны тең ($N_{za} = N_{zb}$), бірақта тармақтар саны тиімді болуына байланысты ерекшеленетін ($W_A \neq W_B$), толық, активті және индуктивті кедергілерінен тұратын дөңгелек айналмалы өрісті алуды қарастырамыз. Бұл мақсатта $F_a = F_b$ теңдігін 1.2 теңдеуін ескере отырып, жазамыз:

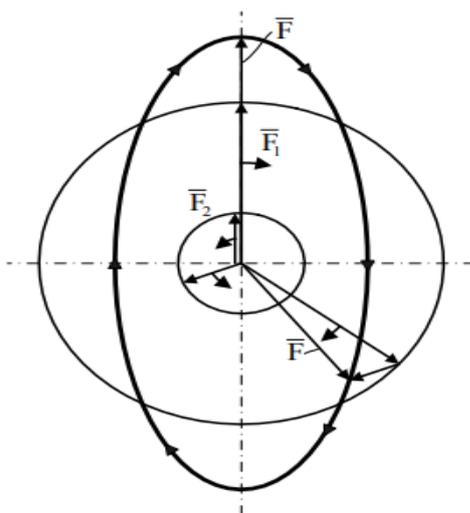
$$0,9 \frac{W_A}{p} I_A = 0,9 \frac{W_B}{p} I_B, \quad (1.11)$$

Осыдан:

$$I_A = \frac{I_B}{\frac{W_A}{W_B}} = \frac{I_B}{k} = I'_B. \quad (1.12)$$

мұндағы $k = \frac{W_A}{W_B}$ – тасмалдау коэффициенті;

I'_B - А орамына келтірілген В орамының тогы.



1.3 сурет - Өзара перпендикуляр орамалары бар екі фазалы асинхронды машинадағы эллиптикалық ЭҚК

Осылайша, қарастырылып отырған жағдайларда екі фазалы машинада айналмалы өрісті алу үшін орамалардың біріне келтірілген токтардың тең болуы және кезеңнің төрттен бір бөлігіне фазада жылжуы қажет. Кешенді түрде бұл шартты келесі түрде жазуға болады:

$$I'_B = jI_A \text{ немесе } I_A = -jI'_B. \quad (1.13)$$

Қанықтылық пен біркелкі ауа саңылауы болмаған кезде ЭҚК теңдігінен ағындардың теңдігіне өтуге болады:

$$\Phi_A = \Phi_B;$$

$$U_A \approx 4,44W_A f \Phi_A \quad \text{және} \quad U_B \approx 4,44W_B f \Phi_B, \quad (1.14)$$

$$\frac{U_A}{W_A} = \frac{U_B}{W_B},$$

немесе

$$U_A = \frac{U_B}{W_B} W_A = k U_B = U'_B, \quad (1.15)$$

мұндағы U'_B - А орам тармағының санына келтірілген В орам кернеуі.

Демек, қарастырылып отырған жағдайда дөңгелек айналмалы өрісті алу үшін бірдей тармақтарға келтірілген А және В орамдарындағы кернеулер екі фазалы симметриялы кернеу жүйесін құрауы керек:

$$U'_B = j U'_A \quad \text{немесе} \quad U'_A = -j U'_B. \quad (1.16)$$

1.1.2 Екі фазалы асимметриялық асинхронды қозғалтқыштардың жұмысын талдауға қатысты симметриялық құрылымдар әдісі

Жалпы жағдайда екі фазалы асинхронды қозғалтқыштың орамаларына ($\theta = 90^\circ$) берілген кернеулер асимметриялық үш фазалы кернеу жүйесін құрайды. Бұл жағдайда орамалар арқылы өтетін I_a және I'_b токтарының екі фазалы жүйесі де асимметриялы болады.

Бұл жағдайда асинхронды қозғалтқыштың жұмысын талдау үшін симметриялы құрылым әдісі қолданылады. Осы әдіске сәйкес кез-келген симметриялы емес үш фазалы кернеулер немесе токтар жүйесі екі симметриялы құрамдас жүйелердің қосындысы ретінде алынады: тура және кері тізбектілік. Тура тізбектілік жүйесінде бастапқы жүйенің кезектесуі болады, ал кері реттілік жүйесінде керісінше болады. Осыған сәйкес келесі теңдеу түрінде жазуға болады:

$$U_A = \dot{U}_{A1} + \dot{U}_{A2}, \quad (1.17)$$

$$U'_B = U'_{B1} + U'_{B2} = j U'_{A1} - j U'_{A2},$$

$$I_A = I_{A1} + I_{A2}, \quad (1.18)$$

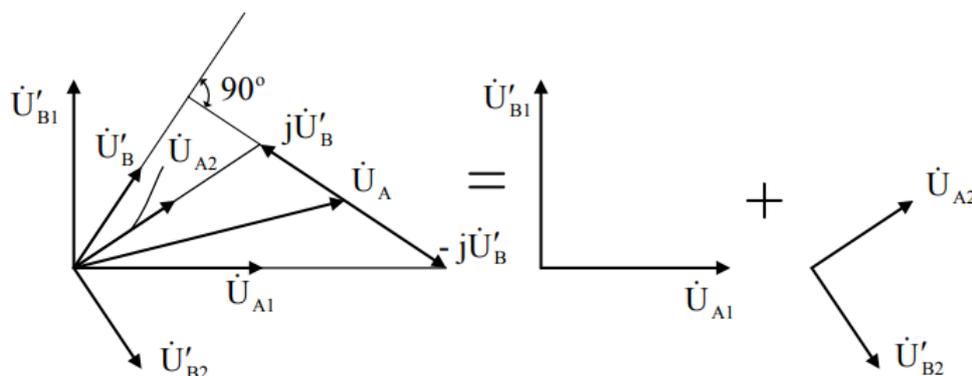
$$I'_B = I'_{B1} + I'_{B2} = j I'_{A1} - j I'_{A2}.$$

«1» және «2» индекстері тура және кері тізбектілік жүйесіне қатысты. Жүйенің (1.17) және (1.18) теңдеулерін шешу арқылы:

$$\dot{U}_{A1} = \frac{\dot{U}_A - j \dot{U}'_B}{2}, \quad \dot{U}_{A2} = \frac{\dot{U}_A + j \dot{U}'_B}{2}, \quad (1.19)$$

$$i_{A1} = \frac{i_A - j i_B}{2}, \quad i_{A2} = \frac{i_A + j i_B}{2}, \quad (1.20)$$

Симметриялық құрамды бейнелеу үшін симметриялы емес екі фазалы жүйе \dot{U}_A және \dot{U}_B кернеулері мен оның симметриялы тура және кері тізбектілігінің кернеулері 1.4 суретте көрсетілген.



1.4 сурет - Векторлардың асимметриялық жүйесі және оның симметриялы құрылымдары

А және В екі фазалы асинхронды қозғалтқыштың орамдары арқылы өтетін I_{A1} және I_{B1} тура тізбекті токтар дөңгелек айналмалы магнит өрісін тудырады, ал I_{A2} және I_{B2} кері тізбекті токтар кері өрісті тудырады. Алынған өріс эллиптикалық болып шығады (1.3 сурет).

Тура өріске қатысты машинаның роторы келесі сырғумен айналады:

$$S_1 = S = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{\Omega_1 - \Omega}{\Omega_1} = 1 - v, \quad (1.21)$$

Кері өріске қатысты ротордың сырғуы:

$$S_2 = S = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{\Omega_1 + \Omega}{\Omega_1} = 2 - S = 1 + v, \quad (1.22)$$

мұндағы n_1 және n - синхронды айналу жиілігі және ротордың айналу жиілігі, айн / мин;

Ω_1 және Ω - синхронды бұрыштық жылдамдық және ротордың бұрыштық жылдамдығы;

$v = \frac{n}{n_1} = \frac{\Omega}{\Omega_1}$ – ротордың айналу жылдамдығы.

Осылайша, қарастырылып отырған жағдайда, тік өріске қатысты машина s сырғымалы қозғалтқыш режимінде, ал айналмалы өріске қатысты – $2 - s$ сырғымалы электр магниттік тежегіш режимінде жұмыс істейді. Электрмен жабдықтаудың асимметрия дәрежесін және онымен бірге кері өрістің шамасын өзгерте отырып, қозғалтқыштың айналу жиілігін реттеуге болады.

1.1.3 Екі фазалы асимметриялық қозғалтқыштың энергетикалық диаграммасы және айналу моменті

Екі фазалы асинхронды асинхронды қозғалтқыштағы энергияны түрлендіру үдерісін 1.5 суретте көрсетілген энергетикалық диаграмма арқылы көрсету ыңғайлы. Мұнда келесі белгілер қабылданды:

P_S - қозғалтқышқа берілетін қуат;

$P_{мг}$ - магниттік шығындар, яғни гистерезис пен құйынды токтардағы шығындар, олар магнит өткізгіштің қайта магниттелуі кезінде пайда болады;

$P_{элс}$ - статор орамаларындағы электр шығыны;

P_K - статор орамасына тізбектей қосылған конденсатордағы және қосымша кедергідегі шығындар;

$P_{эм}$ - магнит өрісі арқылы ротормен алынатын толық электр магниттік қуат;

$P_{эм1}$ - статордан роторға тікелей айналатын магнит өрісі арқылы берілетін тікелей тізбектегі электр магниттік қуат;

$P_{эм2}$ - кері тізбектің электр магниттік қуаты, ол статордан роторға айналмалы өріс арқылы беріледі;

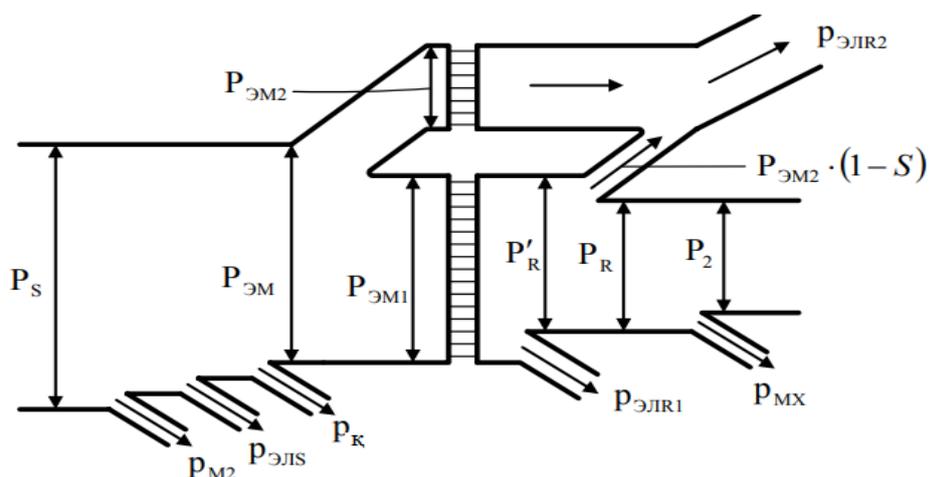
$P_{элr1}$ - тікелей тізбектегі токтармен берілетін ротор орамасындағы электр шығыны;

P'_R - тікелей тізбектегі электр магниттік қуатқа сәйкес келетін толық механикалық қуат;

P_R - қозғалтқыштың нақты механикалық қуаты;

$P_{элr2}$ - кері тізбектегі токтармен берілетін ротор орамасындағы электр шығыны;

P_2 - қозғалтқыш білігіндегі пайдалы қуат.



1.6 сурет - Екі фазалы асимметриялық асинхронды қозғалтқыштың энергетикалық диаграммасы

Диаграммадан тікелей мыналар шығады:

$$P_{\text{эл}R1} = I_{RA1}^2 r_{RA} + I_{RB1}^2 r_{RB} = 2I_{RA1}^2 r_{RA} = P_{\text{эм}1} - P'_R = M_1 \Omega_1 - M_1 \Omega = M_1 \frac{\Omega_1 + \Omega}{\Omega_1} \Omega_1 = M_1 \Omega_1 s, \quad (1.23)$$

мұндағы, тікелей өрістің электр магниттік айналу моменті:

$$M_1 = \frac{P_{\text{эл}R1}}{\Omega_1 s} = \frac{2I_{RA1}^2 r_{RA}}{\Omega_1 s}, \quad (1.24)$$

Жоғарыда айтылғандай, кері өріске қатысты машинаның роторы $s_2 = 2 - s$ сырғуымен айналады, бұл $0 < s < 1$ кезінде электромагниттік тежегіш режиміне сәйкес келеді. Бұл жағдайда ротордың кері өріске қарсы айналуы тура айналу өрісіне қатысты M_1 моментіне байланысты болады. Дәл осы жағдай тура тізбектің механикалық қуатының P'_R - ден P_R -ге дейін төмендеуін көрсетеді (1.7 сурет). Бұл қуаттың төмендеуі ротордағы электр шығындарының бір бөлігін кері тізбектегі токтардан жабуға жұмсалады.

$$P'_R - P_R = M_1 \Omega - M \Omega = M_1 \Omega - (M_1 - M_2) \Omega = M_2 \Omega = M_2 \Omega_1 (1 - s) = P_{\text{эм}2} (1 - s). \quad (1.25)$$

мұндағы $M = M_1 - M_2$ - қозғалтқыштың айналу моменті тура (M_1) және кері (M_2) өрістер моментінің айырмына тең.

Кері тізбектегі токтардан ротордағы электр шығыны кері тізбектің электр магниттік қуатына байланысты жартылай ғана жабылады. Бұл шығындардың тағы бір бөлігі тура тізбектің электр магниттік қуатымен жабылады.

Нәтижесінде:

$$P_{\text{эл}R2} = I_{RA2}^2 r_{RA} + I_{RB2}^2 r_{RB} = 2I_{RA2}^2 r_{RA} = P_{\text{эм}2} + P_{\text{эм}2} (1 - s) = P_{\text{эм}2} (2 - s) = M_2 \Omega_1 (2 - s), \quad (1.26)$$

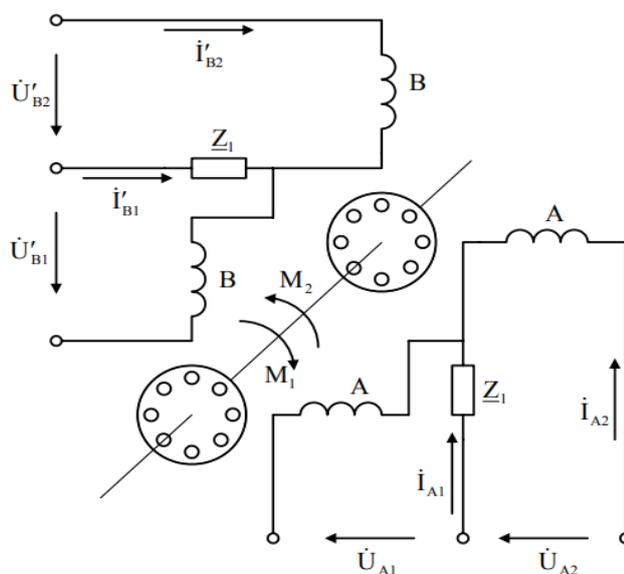
Кері айналатын өріске сәйкес келетін момент:

$$M_2 = \frac{P_{\text{эл}R2}}{\Omega_1 (2-s)} = \frac{2I_{RA2}^2 r_{RA}}{\Omega_1 (2-s)}, \quad (1.27)$$

Екі фазалы асимметриялық қозғалтқыштың айналу моменті:

$$M = M_1 - M_2 = \frac{2I_{RA1}^2 r_{RA}}{\Omega_1 s} - \frac{2I_{RA2}^2 r_{RA}}{\Omega_1 (2-s)}. \quad (1.28)$$

Осылайша, екі фазалы симметриялы емес қозғалтқышты екі бірдей механикалық байланысқан екі фазалы машиналардың жиынтығы ретінде елестетуге болады, олардың біреуінің токтары I_{A1} және I_{B1} тік айналу өрісін тудырады, ал екіншісінің токтары I_{A2} және I_{B2} – кері айналу өрісін тудырады. Нәтижесінде, M_1 және M_2 қарама-қарсы бағытталған екі момент осы модельдің білігіне әсер етеді (1.7 сурет).



1.7 сурет - Екі фазалы асинхронды қозғалтқыштың физикалық моделі

1.2 Бір фазалы асинхронды микроқозғалтқыштар

Автоматика жүйелерінде қуат қозғалтқыштары ретінде бір фазалы асинхронды микроқозғалтқыштар көп қолданылды. Мұндай қозғалтқыштардың статорында әдетте 90 эл.град. кеңістікте жылжытылған 2 орам болады. Ондағы А орамаларының бірі негізгі немесе жұмыстық деп аталады, ал екіншісі көмекші немесе іске қосу деп аталады. Екі орам да бір фазалы желіге параллель қосылады, А орамасы тікелей, ал В орамасы фазаны ауыстыратын элемент арқылы қосылады.

Осылайша, қарастырылып отырған қозғалтқыштар қоректену тәсілі бойынша бір фазалы, ал құрылысы (орындалуы) бойынша – екі фазалы болып табылады.

Фазаны ауыстыратын элементтің түріне және қосалқы ораманы пайдалану әдісіне байланысты бір фазалы асинхронды микроқозғалтқыштар келесі түрлерге ажыратылады:

- 1) Іске қосу кедергісімен;
- 2) Іске қосу конденсаторымен;
- 3) Іске қосу және жұмыс конденсаторымен;
- 4) Жұмыс конденсаторымен;
- 5) Экрандалған полюстермен.

1.2.1 Іске қосу кедергісі бар бір фазалы асинхронды қозғалтқыш

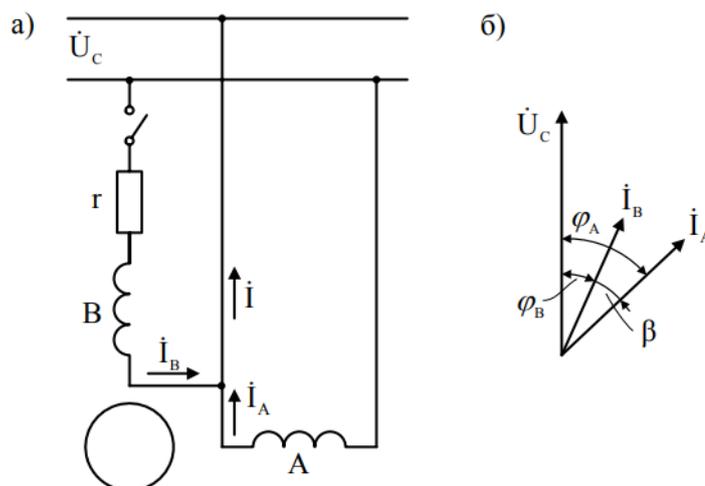
Бір фазалы асинхронды қозғалтқышта бастапқы іске қосу моменті болмайды, оған А негізгі орамнан басқа В қосымша орам енгізіледі. Орамдар бір бірінен 90 эл.градусқа ығысқан. Іске қосу орамы тек іске қосу кезінде

фазаны алмастыру элементі арқылы желіге қосылады. Фазаны алмастыру элементі арқылы А және В орамдарда уақыт бойынша токтардың фаза бойынша ығысуы орындалады. Бұл айналу магнит өрісін алудың қажетті шарты болып саналады.

Фаза алмастыру элементтері ретінде активті кедергілер, сиымдылық, индуктивтік кедергілер қолданылады.

Тәжірибеде іске қосу кедергісінен тұратын бір фазалы қозғалтқыш кеңінен қолданылады (1.8, а сурет). Бұл жағдайда токтардың уақыт бойынша ығысуы іске қосудың В орамындағы активті кедергіні жоғарылату арқылы орындалады. Мұндай өсімді В орам тізбегіне қосымша активті кедергіні қосу арқылы немесе бұл орам сымның қимасын азайту арқылы қол жеткізуге болады. Іске қосу орамасы сымның көлденең қимасын төмендеу оны қосудың қысқа мерзімділігіне байланысты болады.

Іске қосу орамы статордың 1/3 ойықтарын қамтиды, және аз тармақтар санынан тұрады, олар оның 2/3 ойықтарын қамтиды. Сондықтан іске қосу орамының индуктивтілігі негізгі орамның индуктивтілігіне қарағанда аз. Осыған байланысты жұмыс орамының тогы желі кернеуінен іске қосу орамына қарағанда үлкен бұрышқа қалыс қалады (1.8, б сурет).



а - сұлба; б - іске қосу токтарының векторлық диаграммасы

1.8 сурет - Іске қосу кедергісі бар бір фазалы асинхронды қозғалтқыш

Қарастырылып отырған жағдайда қозғалтқыш өнімділігі бойынша асимметриялы, ал $\beta < 90^\circ$ токтарының уақытында фазалық ығысу болғандықтан, іске қосу үдерісінде айналу өрісі эллиптикалық болады.

Осы $x_{kb} = \text{const}$ орамасының тұрақты индуктивті кедергісі кезінде r_{kB} іске қосу орамасының белсенді кедергісінің өзгеруіне байланысты I_{kb} іске қосу тогының өзгеру заңын белгілейді. Осы мақсатта іске қосу кезіндегі В орамасының кернеу теңдеуін қолданамыз және оны келесі ұлғайтқышқа көбейтеміз ($-j \frac{1}{x_{kB}}$):

$$U_c = I_{kB} r_{kB} + j I_{kB} x_{kB}. \quad (1.29)$$

Нәтижесінде келесі теңдеуді аламыз:

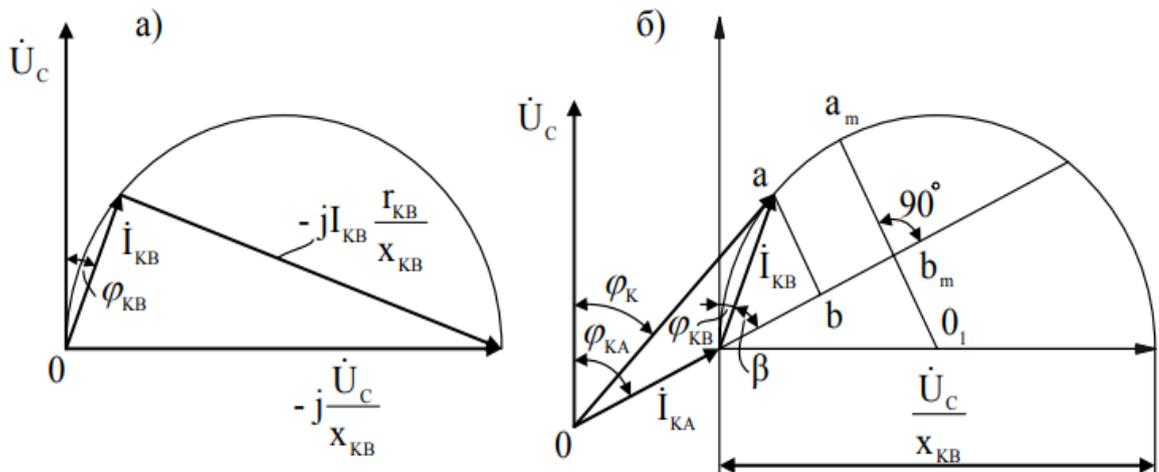
$$-j \frac{U_c}{x_{kB}} = I_{kB} - j I_{kB} \frac{r_{kB}}{x_{kB}}. \quad (1.30)$$

Соңғы теңдеуден r_{kB} кедергісі өзгергенде I_{kB} және $-j I_{kB} \frac{r_{kB}}{x_{kB}}$ векторлары өзара перпендикуляр бола отырып, $-j \frac{U_c}{x_{kB}}$ вектор бағыты мен тұрақты шамасы бойынша қосындысын береді. Сәйкесінше, I_{kB} вектор ұшы $\frac{U_c}{x_{kB}}$ диаметр аумағында қозғалады. Бұл аралық $r_{kB} = 0$ кезіндегі В ораманың тогына тең болады (1.9 сурет).

Қозғалтқыштың толық іске қосу тогы:

$$I_k = I_{kB} + I_{kA}. \quad (1.31)$$

мұндағы I_{kA} – А ораманың іске қосу тогы.



а - іске қосу фазасы; б - қозғалтқыш

1.9 сурет - Асинхронды қозғалтқыштың іске қосу токтарының шеңберлі диаграммалары

Егер А орамасының параметрлері тұрақты болса, онда В орамасының белсенді кедергісі өзгерген кезде I_{kA} ток векторы шамасы мен бағыты бойынша өзгеріссіз қалады. Бұл жағдайда I_k векторының соңы I_{kB} векторының соңымен бірдей шеңберде сырғиды (1.10, б сурет).

Қозғалтқыштың іске қосу моменті келесідей анықталады:

$$M_k \sim I_{kA} \cdot I_{kB} \sin \beta \sim I_{kB} \sin \beta \sim ab. \quad (1.32)$$

Әдетте, В фазасының белсенді кедергісі максималды M_{km} іске қосу моментін алу шартымен таңдалады. Тікелей құрылымы бойынша (1.9, б сурет) $M_{km} \sim a_m b_m$, мұндағы a_m - шеңбердің ортасы О арқылы сызылған түзу сызықпен В фазасының бастапқы ток шеңберімен қиылысу нүктесі, ол I_{kA} ток векторының бағытына перпендикуляр.

Тікелей дөңгелек диаграммадан максималды M_{km} іске қосу моментіне сәйкес келетін іске қосу орамасының I_{kBm} тогын анықтауға болады. M_{km} моментті алуды қамтамасыз ететін В орамасының тізбегінің белсенді кедергісі:

$$r_{kBm} = \sqrt{\left(\frac{U_c}{I_{kBm}}\right)^2 - x_{kB}^2}. \quad (1.33)$$

Іске қосу кедергісі бар бір фазалы асинхронды қозғалтқыштардың іске қосу моменті мен тогы:

$$M_k = (1 \dots 1,2)M_H; \quad (1.34)$$

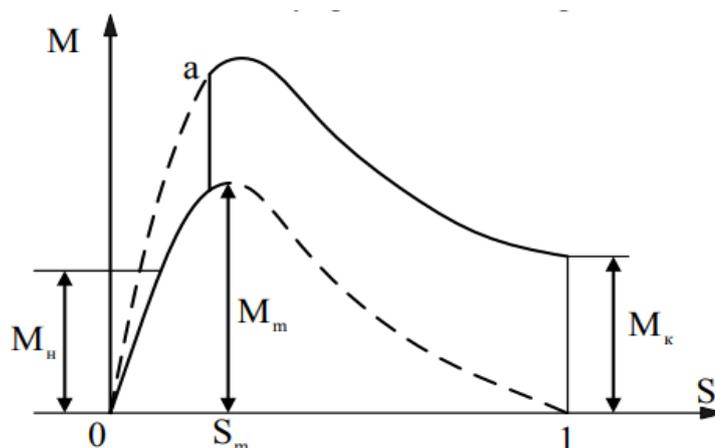
$$I_k = (7 \dots 9)I_H,$$

мұндағы M_H және I_H – ток пен моменттің номиналды мәндері.

Бір фазалы асинхронды қозғалтқыштардың энергетикалық көрсеткіштері: п.э.к. $\eta = 0,4 \dots 0,7$; қуат коэффициенті $\cos\varphi = 0,5 \dots 0,6$; шамадан тыс жүктеме сыйымдылығы $M_M/M_H = 1,4 \dots 2$.

Іске қосу орамасын өшіру, әдетте, автоматты түрде қозғалтқыш білігінде орналасқан орталықтан тепкіш қосқыштың көмегімен немесе арнайы реленің көмегімен жүзеге асырылады. Іске қосу орамасы ажыратылғаннан кейін қозғалтқыш бір фазалы жұмыс режиміне өтеді.

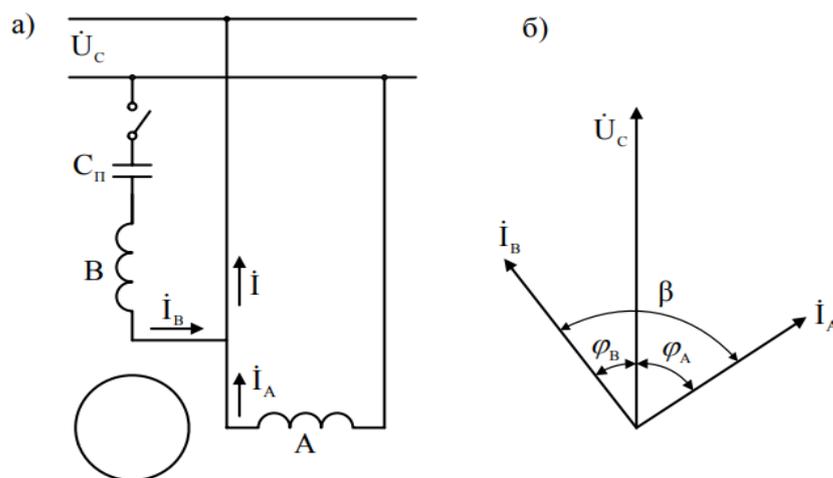
Бір фазалы асинхронды микроқозғалтқыштың $M = f(s)$ (механикалық сипаттамасы) тәуелділігі 1.10 суретте көрсетілген.



1.10 сурет - Іске қосу кедергісі бар бір фазалы асинхронды қозғалтқыштың механикалық сипаттамасы

1.2.2 Іске қосу конденсаторы бар бір фазалы асинхронды қозғалтқыш

Іске қосу конденсаторы бар бір фазалы асинхронды қозғалтқыш деп конденсаторды іске қосу орамасының тізбегіне кіретін фазаны ауыстыратын элемент ретінде пайдаланатын қозғалтқышты атайды (1.11, а сурет). Іске қосу кедергісі бар қозғалтқыш сияқты, мұнда А жұмыс орамасы әдетте ойықтың үштен екісін қамтиды, ал іске қосу орамасы статор ойықтарының үштен бірін қамтиды.



1.11 сурет - (а) іске қосу конденсаторы бар бір фазалы асинхронды қозғалтқыштың сұлбасы және (б) іске қосу токтарының векторлық диаграммасы

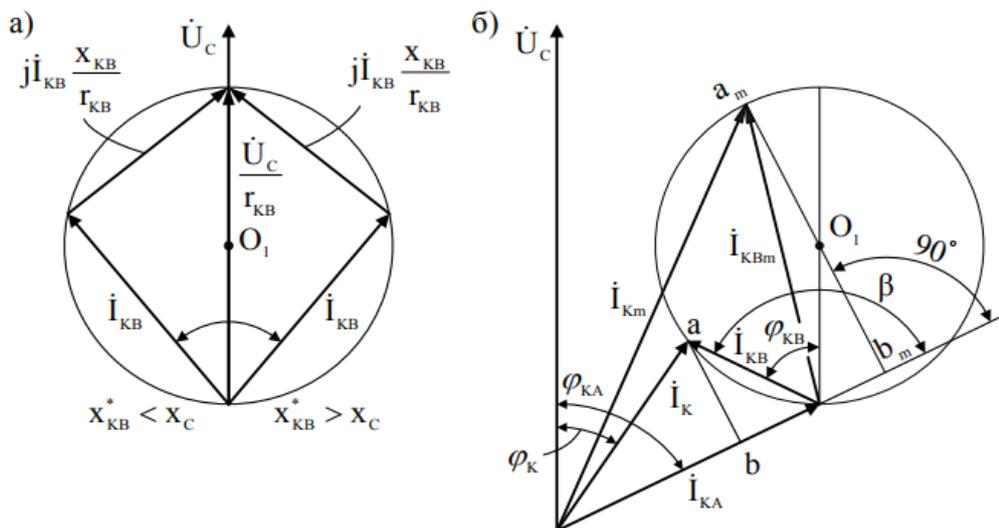
Қосымша кедергінің орнына фаза аралас конденсатор элементін (іске қосу сыйымдылықты) қосу қозғалтқыштың іске қосу құрамын жақсартады. Сондықтан, сыйымдылықты қосу іске қосу кезінде А және В орамаларының токтар фазаның уақыт бойынша едәуір ығысуын қамтамасыз етеді (1.11, б сурет). Сонымен қатар x_c конденсатордың реактивті кедергісі мен орамның x_s индуктивті кедергісінің арасындағы ығысуы 90° градусқа жетеді. Осының салдарынан шеңберлі айналу өрісі пайда болады.

$r_{kB}^* = r_{kB} = const$ ($r_c \approx 0$) орамның активті кедергісі тұрақты болған кездегі, іске қосу орам тізбегінің $x_{kB} = x_{kB}^* - x_c$ толық реактивті кедергісінің өзгеруіне тәуелді I_{kB} іске қосу тогының өзгеру заңдылығын құрамыз. Осы мақсатта В орамасының (1.29) кернеу теңдеуін r_{kB} мәніне бөлеміз:

$$\frac{U_c}{r_{kB}} = I_{kB} + jI_{kB} \frac{x_{kB}}{r_{kB}}. \quad (1.35)$$

Осы теңдеуге сәйкес I_{kB} және $I_{kB} \frac{x_{kB}}{r_{kB}}$ векторлары x_{kB} кедергі өзгергенде өзараперпендикуляр бола отырып, тұрақты шамамен $\frac{U_c}{r_{kB}}$ вектор бағытының

қосындысын береді. I_{kB} ток векторының ұшы $x_{kB} = 0$ болғанда В орамының тогына тең $\frac{U_c}{r_{kB}}$ диаметрмен кеңістікте қозғалады. $x_c > x_{kB}^*$ болғанда I_{kB} ток векторы сол жақ жартылай жазықтықта қозғалады, ал $x_c < x_{kB}^*$ болғанда I_{kB} ток векторы оң жақ жартылай жазықтықта қозғалады (1.12, а сурет).



а - іске қосу фазасының; б – қозғалтқыштың.

1.12 сурет - Асинхронды қозғалтқыштың конденсаторлық іске қосу токтарының шеңберлік диаграммалары

Іске қосу орамасының бұрылыстарының саны және конденсатор сыйымдылығының шамасы қажетті іске қосу моментін алу шартымен немесе айналмалы өрісті алу шартымен таңдалады. Қозғалтқыштың берілген немесе максималды іске қосу моментін қамтамасыз ететін конденсатордың сыйымдылығын анықтау үшін іске қосу токтарының дөңгелек диаграммасын құруға болады.

Қозғалтқыштың іске қосу тогы:

$$I_k = I_{kA} + I_{kB}. \quad (1.36)$$

А орамының параметрі тұрақты болғанда іске қосу тогы $I_{kA} = const$. Сәйкесінше $U_c = const$, $r_{kB} = const$ және $x_{kB} = x_{kB}^* - x_c = var$ болғандағы I_k нәтижелік іске қосу тогы векторының ұшы $\frac{U_c}{r_{kB}}$ диаметрмен кеңістікте қозғалады (1.12, б сурет). Бұл жағдайда іске қосу моменті:

$$M_k \sim I_{kA} \cdot I_{kB} \sin \beta \sim I_{kB} \sin \beta \sim ab, \quad (1.37)$$

мұндағы ab - I_k вектор ұшынан I_{kA} вектор тогына дейін түсірілген перпендикуляр қимасы.

Максималды іске қосу моменті:

$$M_{km} \sim a_m \cdot b_m, \quad (1.38)$$

мұндағы a_m – О аумағының ортасы арқылы өтетін I_k және I_{kB} іске қосу токтарының аумағын қиып өтетін нүкте, ол I_{kB} ток векторына перпендикуляр.

Берілген немесе максималды іске қосу моментіне сәйкес келетін конденсатордың реактивтілігін анықтау үшін оларға сәйкес келетін В фазасының I_{kB} іске қосу тогын дөңгелек диаграммадан анықтау керек, одан кейін белгілі U_c , r_{kB} және x_k мәндері арқылы келесі өрнекті аламыз:

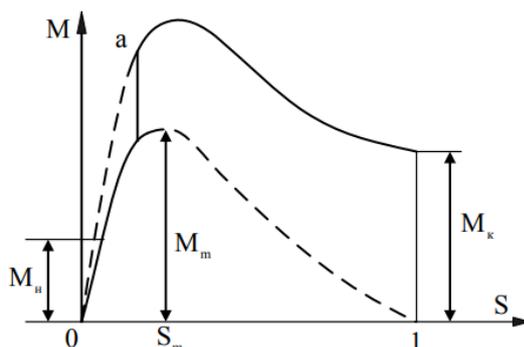
$$x_{kB} = x_{kB}^* - x_c = \sqrt{\left(\frac{U_c}{I_{kB}}\right)^2 - r_{kB}^*}, \quad (1.39)$$

мұндағы

$$x_c = x_{kB}^* - \sqrt{\left(\frac{U_c}{I_{kB}}\right)^2 - r_{kB}^*}, \quad (1.40)$$

$$C_{\Pi} = \frac{10^6}{2\pi f x_c}, \text{ мкФ.} \quad (1.41)$$

Іске қосу үдерісінде іске қосу конденсаторы бар бір фазалы асинхронды қозғалтқыш екі фазалы қозғалтқыш ретінде жұмыс істейді. Белгілі бір жылдамдыққа жеткенде (1.13 суретте А нүктесі) іске қосу орамасы автоматты түрде ажыратылады және қозғалтқыш бір фазалы режимге өтеді. Бұл жағдайда іске қосу моменті $M_k = (2,0...2,5) M_n$ мәндеріне жетуі мүмкін.

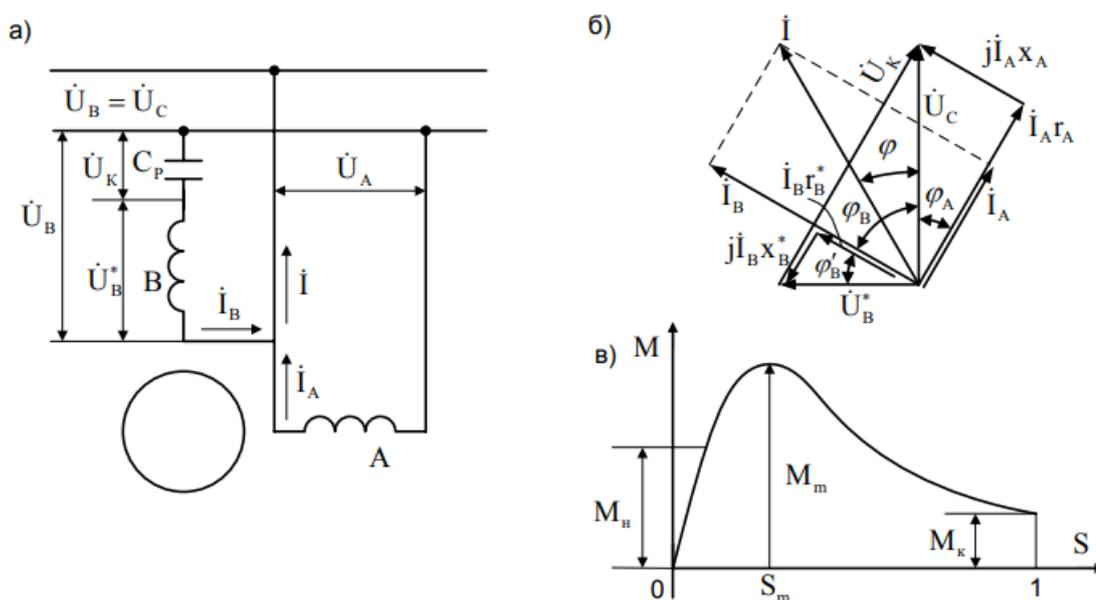


1.13 сурет - Конденсаторды іске қосатын бір фазалы асинхронды қозғалтқыштың механикалық сипаттамасы

1.2.3 Асинхронды конденсаторлы қозғалтқыш

Қоректендіру әдісі бойынша бір фазалы асинхронды қозғалтқыш конденсатор деп аталады, егер оның орамаларының бірінің тізбегіне

сыйымдылығы бар конденсатор үнемі қосылып тұрса (1.14, а сурет). Демек, мұндай қозғалтқышта статор орамаларының екеуі де іске қосу кезінде де, жұмыс кезінде де бір фазалы айнымалы ток желісіне қосылған. Бұл жағдайда А орамасы желіге тікелей, ал В орамасы конденсатор арқылы қосылады. Екі орамда бірдей ойықтардан тұрады: $(N_{ZA} = N_{ZB} = \frac{N_{ZS}}{2})$.



а – принципалдық сұлбасы; б - дөңгелек өрістегі векторлық диаграмма; в - механикалық сипаттамасы.

1.14 сурет - Асинхронды конденсаторлы қозғалтқышы

А және В орамаларының кернеу теңдеуінің симметриялы компоненттері әдісіне сәйкес келесі түрде жазуға болады:

$$U_c = U_{A1} + U_{A2} = I_{A1}Z_{A1} + I_{A2}Z_{A2}; \quad (1.42)$$

$$U'_c = U'_{B1} + U'_{B2} = I'_{B1}Z'_{B1} + I'_{B2}Z'_{B2} = jI_{A1}Z'_{B1} - jI_{A2}Z'_{B2}. \quad (1.43)$$

мұндағы

$$U'_c = kU'_c; I'_{B1} = \frac{I_{B1}}{k} = jI_{A1}; \quad I'_{B2} = \frac{I_{B2}}{k} = jI_{A2}; \quad (1.44)$$

$$Z_{A1} = Z'_{B1} = k^2Z_{B1}; \quad Z_{A2} = Z'_{B2} = k^2Z_{B2}.$$

$N_{2A} \neq N_{2B}$ болғанда орамалардың параметрлері арасындағы қатынас басқаша болады [6].

(1.42) теңдеуі (1.43) теңдігін есере отырып келесідей түрленеді:

$$U_c = jkI_{A1}Z_{B1} - jkI_{A2}Z_{B2}. \quad (1.45)$$

Дөңгелек айналмалы өріс кері токтар болмаған кезде пайда болады, яғни $I_{A2} = 0, I_{B2} = 0$ және $I_{A1} = I_A, I_{B1} = I_B = jkI_{A2}$ болған жағдайда. Онда А және В орамаларының кернеу теңдеулері:

$$U_c = I_{A1}Z_{A1} = I_A(r_{A1} + jx_{A1}); \quad (1.46)$$

$$U_c = I_B Z_{B1} = jkI_{A1}Z_{B1} = jkI_A(r_{B1} + jx_{B1}) \approx jkI_A(r_{B1}^* + jx_{B1}^* - jx_c) = jU_B^* - jkI_A x_c. \quad (1.47)$$

(1.46) және (1.47) теңдеулердің оң бөлігін теңестіре отырып, келесі теңдеуді аламыз:

$$U_c = jkI_{A1}Z_{B1} - jkZ_{B2}I_{A2}. \quad (1.48)$$

Дөңгелек айналу өрісі кері тізбекті токтар болмағанда пайда болады, егер шарт бойынша $I_{A1} = 0, I_{B2} = 0$, және $I_{A1} = I_A, I_{B1} = I_B = jkI_A$. Онда А және В орамдардың кернеу теңдеуі:

$$U_c = I_{A1}Z_{A1} = I_A(Z_{A1} + jx_{A1}), \quad (1.49)$$

$$U_c = I_B Z_{B1} = jkI_{A1}Z_{B1} = jkI_A(r_{B1} + jx_{B1}) \approx jkI_A(r_{B1}^* + jx_{B1}^* - jx_c) = jU_{B1}^* - jkI_{A1}x_c. \quad (1.50)$$

(1.49) және (150) теңдеулерінің оң бөлігін теңестіре отырып келесі теңдеуді аламыз:

$$r_{A1} + x_{A1} = jkr_{B1}^* - kx_{B1}^* + kx_c, \quad (1.51)$$

осыдан:

$$\begin{aligned} r_{A1} &= kx_c - kx_{B1}^*, \\ x_{A1} &= kr_{B1}^*, \end{aligned} \quad (1.52)$$

$$k = \frac{x_{A1}}{r_{B1}^*}; \quad (1.53)$$

$$x_c = \frac{r_{A1} + kx_{B1}^*}{k} = \frac{r_{A1}}{k} = x_{B1}^* = \frac{r_{A1}}{x_{A1}} \cdot r_{B1}^* + x_{B1}^*; \quad (1.54)$$

$r_{B1}^* = \frac{r_{A1}}{k^2}$ және $x_{B1}^* = \frac{x_{A1}}{k^2}$ болғандықтан (1.53) және (1.54) теңдеулерін түрлендіріп келесі теңдеуді аламыз:

$$k = \frac{r_{A1}}{x_{A1}} = ctg\varphi_{A1}; \quad (1.55)$$

$$x_c = x_{A1}\left(1 + \frac{1}{ctg^2\varphi_A}\right) = x_{A1}(1 + tg^2\varphi_A) = \frac{x_{A1}}{\cos^2\varphi_A}; \quad (1.56)$$

Осылайша, қарастырылып отырған қозғалтқыштағы айналмалы өрісті сыйымдылық арқылы (1.53) және (1.55) теңдеулерімен анықталған k трансформация коэффициентінің белгілі бір мәні кезінде ғана алуға болады. Дөңгелек өрістегі асинхронды конденсатор қозғалтқышының векторлық диаграммасы 1.14, б суретте көрсетілген.

Бұл диаграмманы құру үшін φ_A бұрышының шамасын анықтау керек. Осы мақсатта біз дөңгелек өрісте орамалар тұтынатын қуаттар бірдей екенін ескереміз, яғни:

$$P_A = P_B; \quad (1.57)$$

$$U_c I_A \cos \varphi_A = U_c I_B \cos \varphi_B. \quad (1.58)$$

Сәйкесінше асинхронды конденсаторлы қозғалтқыштың толық қуаты:

$$P = 2P_A = 2U_c I_A \cos \varphi_A. \quad (1.59)$$

Екінші жағдайда:

$$P = U_c I \cos \varphi. \quad (1.60)$$

Онда:

$$I \cos \varphi = 2I_A \cos \varphi_A. \quad (1.61)$$

Сонымен қатар:

$$I = \sqrt{I_A^2 + I_B^2} = \sqrt{I_A^2 + k^2 I_B^2} = I_A \sqrt{1 + k^2} = I_A \sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \varphi_A} = \frac{I_A}{\sin \varphi_A}. \quad (1.62)$$

Нәтижесінде:

$$I_A \frac{\cos \varphi}{\sin \varphi} = 2I_A \cos \varphi_A. \quad (1.63)$$

немесе

$$\cos \varphi = 2 \sin \varphi_A \cos \varphi = \sin 2\varphi_A. \quad (1.64)$$

Бұл теңдік егер төмендегі шартты орындаса қолайлы:

$$\varphi_A = \varphi = 30^\circ. \quad (1.65)$$

мұндағы φ - тұтынылатын I ток пен желі кернеуі арасындағы фазалық ауысу. Осыдан U_c кернеуі мен B орамдағы ток арасындағы фазалық ығысу: $\varphi_B = 90^\circ - \varphi_A = 60^\circ$.

Трансформация коэффициенті тұрақты шама болғандықтан және айналу жылдамдығы (жүктеме) өзгерген кезде қозғалтқыштың параметрлері өзгеретіндіктен, бұл жағдайда айналмалы айналу өрісін тек белгілі бір жұмыс режимінде (бір жүктеме; бір жылдамдық) алуға болады, онда $k = \operatorname{ctg} \varphi_A$. Егер соңғы шарт бос жүрістен қысқа тұйықталуға дейінгі ($n = 0$) аралықтағы жүктемелердің ешқайсысында қанағаттандырылмаса, онда мұндай

қозғалтқышта В орамасының тізбегіне қосылған конденсатор сыйымдылығының шамасына қарамастан, айналмалы өрісті алу мүмкін емес.

Әдетте асинхронды конденсаторлық қозғалтқыштар, яғни C_p сыйымдылығы үнемі қосылатын (жұмыс істейтін) қозғалтқыштар айналмалы өрісті номиналды немесе оған жақын жұмыс режимінде алуға болатындай етіп есептеледі. Осының арқасында жеткілікті жоғары энергетикалық көрсеткіштер мен шамадан тыс жүктеме алуға болады:

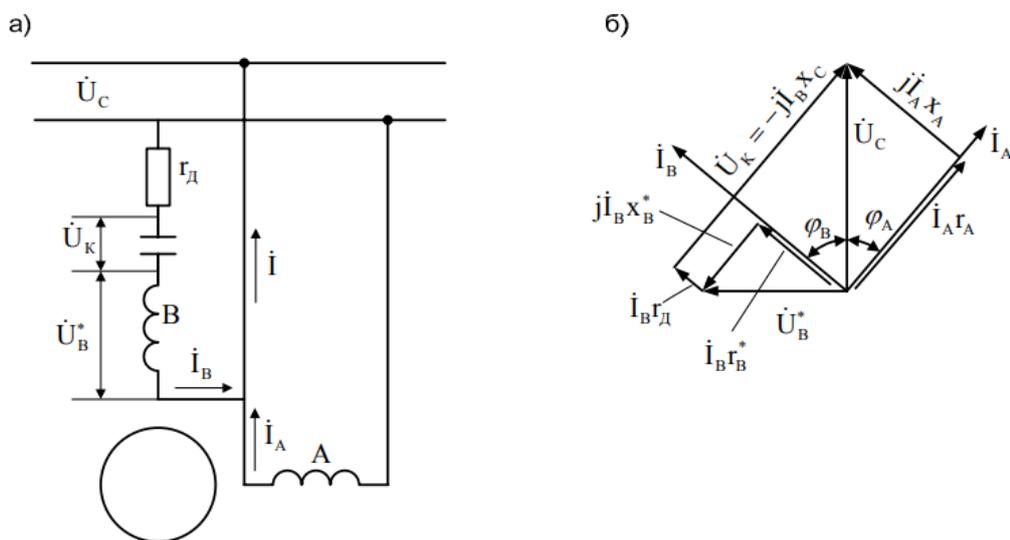
$$\eta = 0,6 \dots 0,75; \cos\varphi = 0,8 \dots 0,95; k_m = \frac{M_m}{M_H} = 1,6 \dots 2,2. \quad (1.66)$$

Алайда, роторда қозғалмай тұрғанда мұндай қозғалтқыштың айналу өрісі айқын эллиптикалық сипатқа ие және іске қосу моменті шамалы: $M_K = (0,3 \dots 0,6)M_M$. Сондықтан бір жұмыс сыйымдылығы бар қозғалтқыштарды жеңіл іске қосу жағдайлары бар қондырғылар мен құрылғылар қолданылады.

Асинхронды конденсатор қозғалтқышының $M = f(s)$ тәуелділігі 1.14, в суретте көрсетілген.

Көбінесе конденсатормен айналмалы өрісті алу үшін R_K қосымша кедергісі қосылады (1.15, а сурет). Бұл жағдайда (1.52) екінші теңдеу келесі түрге ие болады:

$$x_{A1} = k(r_{B1}^* + R_K). \quad (1.67)$$



1.15 сурет - Іске қосу орамасының (а) тізбегіндегі конденсатор мен қосымша кедергісі бар бір фазалы асинхронды қозғалтқыш және оның дөңгелек өрістегі векторлық диаграммасы (б)

Жоғарыда жасалғанға ұқсас тиісті түрлендірулер арқылы мұны дәлелдеуге болады:

$$R_K = \frac{x_A}{k} - \frac{r_A}{k^2} = \frac{r_A}{k} \left(\frac{x_A}{r_A} - \frac{1}{k} \right) = \frac{1}{k} z_A \cos\varphi_A (tg\varphi_A - \frac{1}{k}). \quad (1.68)$$

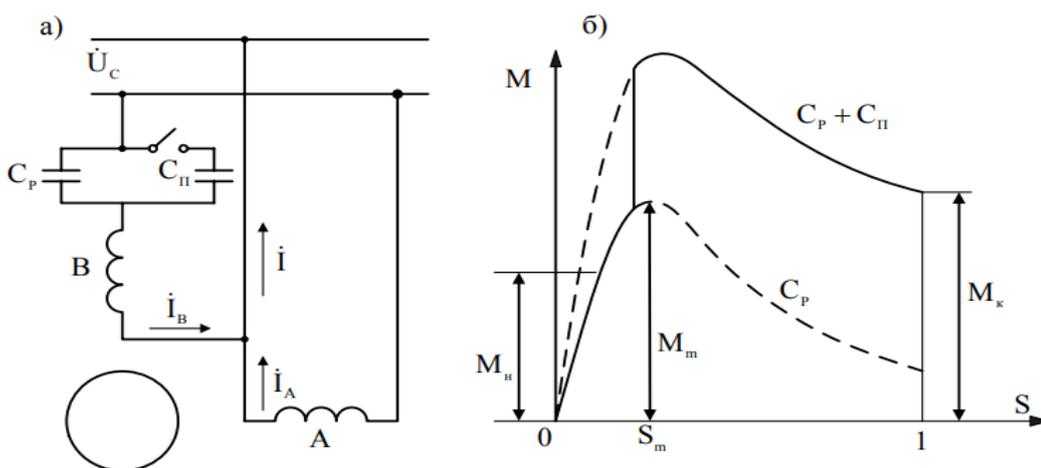
$\frac{1}{k} = \frac{W_B}{W_A}, z_A, \cos\varphi_A$ болғандықтан бұл шамалар оң, R_k қосымша кедергі нолден үлкен болғанда келесі шарт орындалуы тиіс:

$$\operatorname{tg}\varphi_A > \frac{1}{k} \text{ немесе } \operatorname{tg}\varphi_A > \frac{W_B}{W_A}. \quad (1.69)$$

мұндағы $r_A, x_A, \cos\varphi_A, \operatorname{tg}\varphi_A$ - айналмалы өрістегі қозғалтқыштың А фазасының параметрлері.

Қарастырылып отырған жағдайға сәйкес келетін векторлық диаграмма 1.15, б суретте көрсетілген.

Егер қозғалтқышқа номиналды режимде жоғары энергетикалық көрсеткіштерді сақтай отырып, іске қосу қасиеттеріне қатысты жоғары талаптар қойылса, онда В орамасының тізбегіне параллель екі конденсатор кіреді: олар C_p сыйымдылығы бар жұмысшы және C_{II} сыйымдылығы бар іске қосу (1.16, а сурет). Жұмыс конденсаторы үнемі қосылып тұрады, ал іске қосу тек іске қосу уақытында қосылады. Мұндай қозғалтқыш іске қосу және жұмыс конденсаторы бар асинхронды конденсатор қозғалтқышы (АКҚ) деп аталады.



1.16 сурет - Іске қосу және жұмыс конденсаторы бар асинхронды қозғалтқыш (а) және оның механикалық сипаттамасы (б)

Жұмыс конденсаторының сыйымдылығы номиналды режимде айналмалы өрісті алу шартымен есептеледі. Іске қосу конденсаторының сыйымдылығы жұмыс сыйымдылығымен бірге бастапқы іске қосу моментінің қажетті мөлшерін қамтамасыз ететіндей етіп таңдалады. Қарастырылып отырған қозғалтқыштың механикалық сипаттамасы 1.16, б суретте көрсетілген.

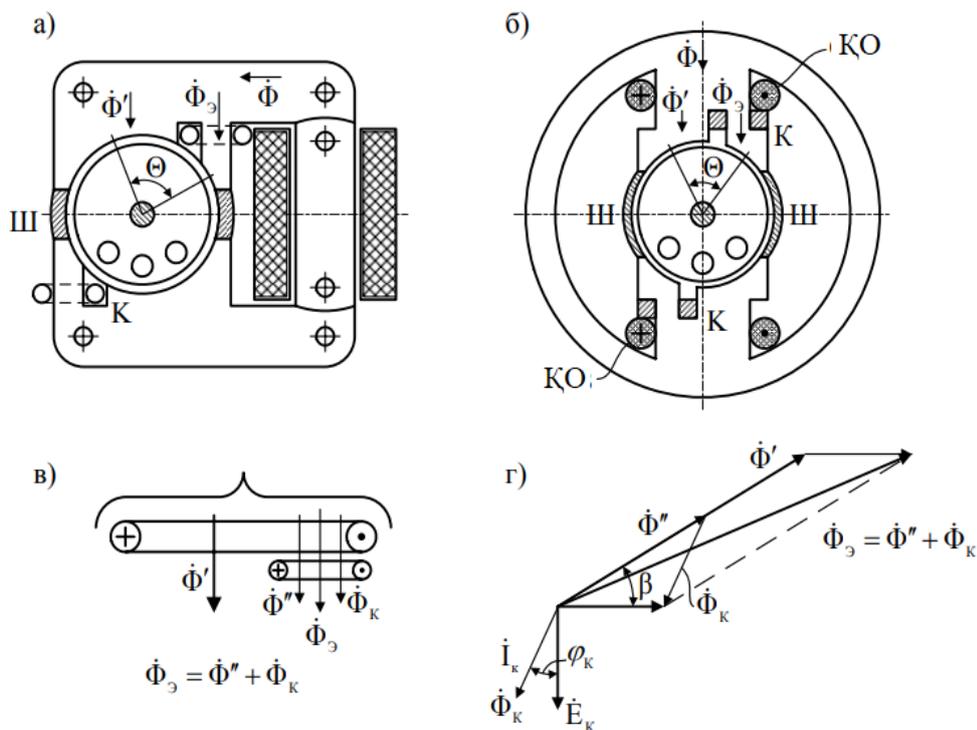
Іске қосу және жұмыс конденсаторы бар қозғалтқыш келесі энергетикалық көрсеткіштермен сипатталады:

$$M_k = (2 \dots 2,2)M_H; \eta = 0,4 \dots 0,9; \cos\varphi = 0,8 \dots 0,95; M_m = (1,8 \dots 2,5)M_H. \quad (1.70)$$

1.2.4 Экрандалған полюстері бар бір фазалы асинхронды қозғалтқыш

Төменгі қуатты бір фазалы асинхронды қозғалтқыштардың ішінде экрандалған полюстері бар айқын полюсті қозғалтқыштар кең қолданылады. Олар негізінен қуаты 0,6...25 Вт, жиілігі 50 Гц және полюстер саны $2p = 2$ және $2p = 4$ жасап шығарылады. Бұл қозғалтқыштар желдеткіш жүктемесі бар тұрмыстық аспаптардың жетектеріне арналған: желдеткіштер, электр кептіргіштер, ауа үрлегіштер, кір жуғыш машиналар, көшірме машиналары, яғни іске қосу моментінің еселігі төмен электр аспаптарында қолданылады. Олардың кең қолданылуы құрылымының қарапайымдылығына, пайдаланудың қарапайымдылығына және арзан бағасына байланысты.

1.17, а, б суреттерде экрандалған полюстері бар екі полюсті қозғалтқыш көрсетілген.



а - симметриялы емес магниттік жүйемен; б - симметриялы магниттік жүйемен; в, г - қозғалтқыштың жұмыс принципін түсіндіретін магниттік ағындардың векторлық диаграммалары.

1.17 сурет - Экрандалған полюстері бар асинхронды қозғалтқыш

Ол шығыстық қоздыру орамасынан және тікелей полюстерде орналасқан қоздыру орамасынан тұрады. Екі жағдайда да полюс ұштарының шеттері арасында магниттік Ш шунттар қарастырылған, бұл ауа саңылауының біркелкілігін және өріс пішінін жақсартуды қамтамасыз етеді. Қозғалтқыш статоры электр техникалық болаттан дайындалған жұқа парақтардан тұрады.

Статор немесе ярма полюстерінде бір фазалы қоздыру орамасының орамдары орналастырылады. Әр полюс бойлық ойықпен екі тең емес бөлікке бөлінеді. Полюстің кіші бөлігі қысқа тұйықталған ораммен оралған, көбінесе бір қысқа тұйықталған орамнан тұрады, ол көбінесе қысыммен алюминий парақтарымен жасалады.

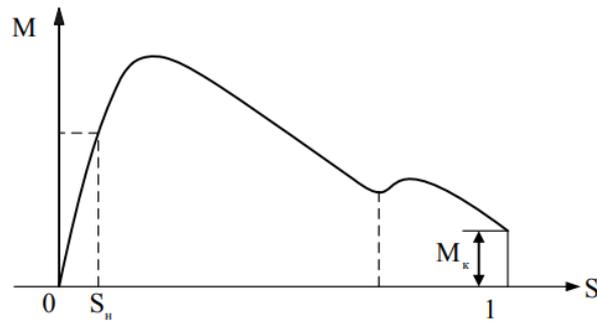
Қозғалтқыштың роторы қысқа тұйықталған («тиін торы»), ол алюминийді қысыммен құю арқылы дайындалады.

Экрандалған полюстері бар асинхронды қозғалтқыштың жұмыс принципі қарастырсақ, қоздыру орамасының магниттеу тогы Φ пульсациялық ағынды тудырады, оның бір бөлігі Φ' экрандалмаған бөлік бойымен өтеді, ал екінші бөлігі Φ'' қысқа тұйықталған тармақпен байланысады және онда E_k электр қозғаушы күшін тудырады, ол уақыт бойынша Φ_3 ағынынан (90°) артта қалады. ЭҚК E_k әсерінен қысқа тұйықталған тармағынан I_k тогы өтеді, ол ток E_k (тармақтың индуктивтілік әсерінен) ЭҚК-нен φ_k бұрышына қалады. I_k тогы I_k тогының фазасымен сәйкес келетін Φ_k магнит ағымын тудырады. Нәтижесінде экрандау бөлігінде $\Phi_3 = \Phi'' + \Phi_k$ тең нәтижелік өріс пайда болады, ол Φ' ағымынан уақыт бойынша β бұрышына ығысады (1.17, в, г сурет). Кеңістікте бұл ағымдар θ бұрышына ығысқан.

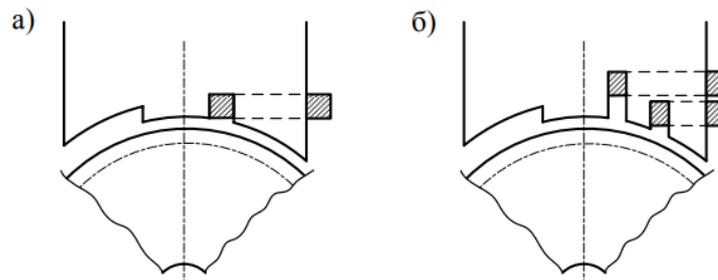
Сонымен уақыт пен кеңістікте ығысқан екі пульсациялық ағын айналмалы магнит өрісін құрайды. Φ' және Φ_3 ағындары мөлшері бойынша әр түрлі болғандықтан және олардың уақыт пен кеңістіктегі ығысуы аз болғандықтан, айналмалы өріс күрт өзгеріп эллиптикалық болады. Осыған байланысты, қарастырылып отырған қозғалтқыштардың көпшілігінде іске қосу моменті номиналдан 20- 30% құрайды және тек арнайы жағдайларда 60- 100% жетеді.

Экрандалған полюстерден тұратын қозғалтқыштың механикалық сипаттамасы қарапайым қозғалтқыштың механикалық сипаттамасынан өзгеше болады, себебі $s = 2/3$ бөлігін құраған кезде, яғни айналу жиілігі $n = 1/3n_1$ тең болғанда механикалық сипаттамада ойықтың болуымен ерекшеленеді (1.18 сурет). Бұл жағдайдың болуы МКК-нің 3 гармоникасының әсер етуі болып саналады. Кейбір жағдайларда айналу жиілігі $n = n_1/3$ тең болғанда, момент қисығының ойығы жоғары болады, себебі $n = n_1/3$ тең айналу жиілігі кезінде айналу моменті іске қосу моментіне қарағанда аз болуы мүмкін және қозғалтқыш білігіндегі кедергі моментінің аз мәнінде болуына байланысты $n = 1/3n_1$ тең айналу жиілігімен қозғалтқыш іске қосылады.

Момент қисығындағы ойықты азайту үшін полюстің экрандалмаған бөлігінің астындағы ауа саңылауы полюстің қалған бөлігінен шамамен екі есе үлкен етіп орындалады (1.19, а сурет). Осыған байланысты кейбір қозғалтқыштарда бір емес, екі (үш) ойық жасалады, олардың әрқайсысы тиісті қысқа тұйықталған тармақтарға қойылады (1.19, б сурет).



1.18 сурет - Экрандалған полюстері бар асинхронды қозғалтқыштың механикалық сипаттамасы



а - полюстің экрандалмаған бөлігінің астындағы ауа саңылауын ұлғайту;
б - бірнеше қысқа тұйықталған тармақтарды қолдану

1.19 сурет - Экрандалған полюстері бар қозғалтқыштың механикалық сипаттамасындағы ауытқуды азайту құралы

Экрандалған асинхронды қозғалтқыштың энергеикалық көрсеткіштері:

$$\eta = 25 \dots 40\%; \cos\varphi = 0,4 \dots 0,6; k_m = \frac{M_m}{M_H} = 1,1 \dots 1,25. \quad (1.71)$$

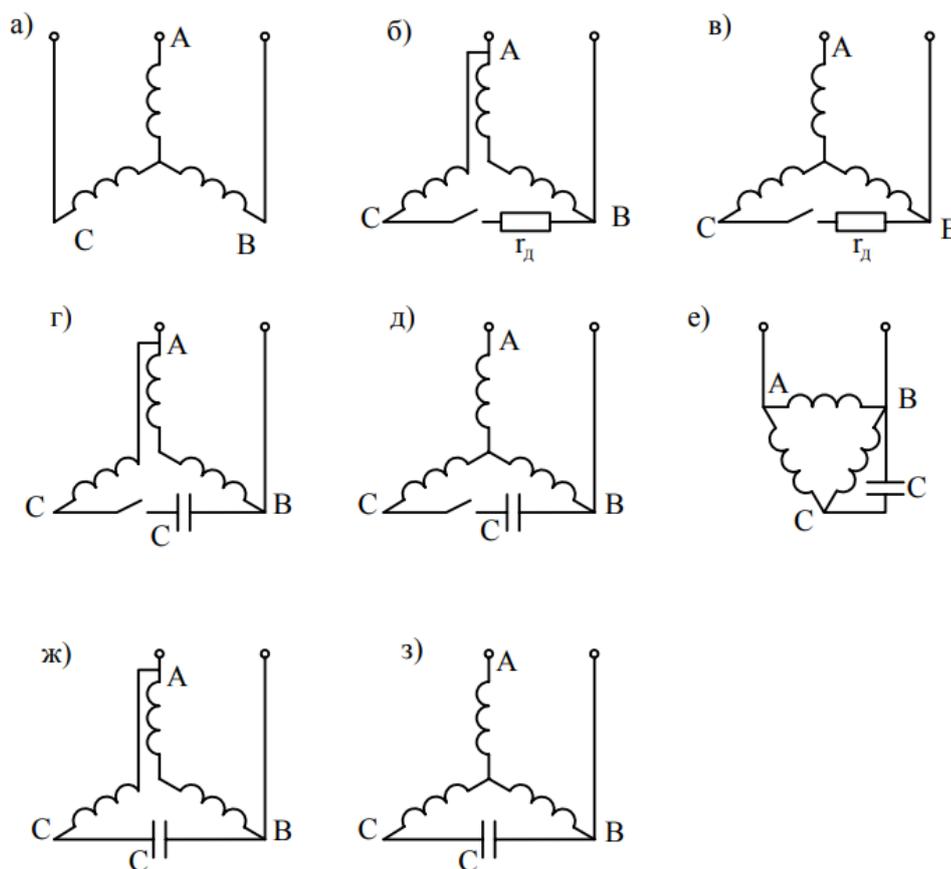
Қозғалтқыш шығындарының едәуір бөлігі қысқа тұйықталған тармақ шығындары болғандықтан, жүктеме бос жүрістен номиналдыға ауысқан кезде оның жалпы шығындары тек 40-50% өзгереді. Қорытындылай келе, экрандалған полюстері бар конденсаторсыз асинхронды қозғалтқышпен қатар конденсаторлық айқын полюсті асинхронды қозғалтқыш та қолданылады. Олар дыбыс және бейне жазу құрылғыларында және кинотехникасында кеңінен қолданылады.

1.2.5 Бір фазалы желімен жұмыс істеу үшін үш фазалы асинхронды қозғалтқышты пайдалану. Әмбебап асинхронды қозғалтқыш

Қысқа тұйықталған роторы бар асинхронды үш фазалы электр қозғалтқышы кейбір жағдайларда оның құрылысы мен орамдық деректерін өзгертпестен бір фазалы желімен жұмыс істеу үшін қолданылады. Сонымен

қатар айналмалы магнит өрісі үш фазалық орамамен пайда болады, онда R, L және C фаза алмастыру элементтерінің көмегімен асимметриялық үш фазалы ток жүйесі пайда болады.

Бір фазалы желіге қосылатын үш фазалы асинхронды қозғалтқыштың бірнеше сұлбалары болады. Оның кейбіреуі 1.20, б-з дейінгі суреттермен көрсетілген. Сұлбаның бір бөлігі фазаны ауыстыратын элементтері бар фазаны іске қосқаннан кейін өшіруді және қозғалтқышты бір фазалы режимге ауыстыруды қарастырады (1.20, б-д суреттер). Басқа сұлбаларда барлық үш фаза іске қосу кезінде де, жұмыс кезінде де қосулы болады (1.20, е, ж, з суреттер).



1.20 сурет - Бір фазалы желіден жұмыс істеуге арналған үш фазалы асинхронды қозғалтқыштарды қосу сұлбалары

Қарастырылып отырған жағдайларда фазаны ауыстыратын элементтердің қажетті мәндерін анықтау өте маңызды, оларды есептеу өте қиын. Сондықтан оларды көбінесе іске қосу және жұмыс моменттері мен фазалық токтардың тиісті мәндерін, сондай-ақ қозғалтқыш температурасының рұқсат етілген мәннен асып кетуі кезіндегі мәндерін алу тәжірибелік түрде жүргізіледі. Қозғалтқыштың бір фазалы желімен іске қосуы кезіндегі фазалық токтары үш фазалық желімен іске қосылуы кезіндегі фазалық токтарға қарағанда жоғары болуы мүмкін. Қозғалтқыштың жұмыс режиміндегі фазалық токтарына келетін болсақ, екі жағдайда да олар шамамен бірдей болуы

керек. Бұл қозғалтқышты үш фазалы және бір фазалы қоректендіру арқылы бірдей қыздыруға мүмкіндік береді.

Қыздыруға рұқсат етілген токтардағы ең үлкен іске қосу моменті бір фазалы іске қосу конденсаторынан тұратын қозғалтқышты қолдану арқылы алынады, ондағы момент $M_k = (2 \dots 3,5)M_H$, үш фазалы қозғалтқыштарда $M_k = (1,2 \dots 2,5)M_H$, ал кедергісі бар қозғалтқыштардың көпшілігінде $M_k = (1,2 \dots 2,5)M_H$.

Ең үлкен іске қосу тогы бір фазалы іске қосу кедергісі бар қозғалтқыштарда болады - $I_k = (6 \dots 9) I_H$; іске қосу сыйымдылығынан тұратын қозғалтқыштарда $I_k = (3 \dots 5) I_H$; үш фазалы қозғалтқыштарда $I_k = (3 \dots 6) I_H$.

Іс жүзінде үш фазалы ретінде жұмыс істеу үшін арнайы есептелген әмбебап асинхронды қозғалтқыштар (1.20, а сурет) және бір фазалы айнымалы ток желісімен жұмыс істейтін (1.20 ж, з сурет) қозғалтқыштар кеңінен қолданылады. Олардың әмбебаптығы келесідей анықталады: егер бір фазалы қоректендіру кезінде арнайы жобаланған бір фазалы қозғалтқыштардың сипаттамаларына жақын жұмыстық және іске қосу сипаттамалары қамтамасыз етілсе.

Бірінші сұлба (1.20, ж сурет) екі фазалы конденсатор қозғалтқышының сұлбасына ұқсас, онда орамалардың бірі үш фазалы қозғалтқыштың екі фазасының тізбектей қосылуынан пайда болады және $W_A = \sqrt{3}W_\phi$ бұрылыстарының тиімді санына ие. Конденсатор орамасының рөлін қозғалтқыштың қалған үшінші фазасы $W_B = W_\phi$ бұрылыстарымен орындалады. Мұндағы W_ϕ - үш фазалы қозғалтқыштың фазалық бұрылыстарының тиімді саны.

(1.55) және (1.56) формулаларға сәйкес бұл жағдайда дөңгелек айналмалы өріс төмендегі шарттармен орындалады:

$$k = \frac{W_A}{W_B} = \operatorname{ctg} \varphi_A = \sqrt{3} \text{ немесе } \varphi_A = \varphi = 30^\circ. \quad (1.72)$$

Бұл жағдайда $\cos \varphi = 0,866$ үш фазалы асинхронды машинаға сәйкес келеді, онда:

$$x_c = \frac{x_A}{\cos^2 \varphi_A} = \frac{x_B^* k^2}{\cos^2 \varphi_A} = \frac{Z'_B \sin \varphi_A \operatorname{ctg}^2 \varphi_A}{\cos^2 \varphi_A} = \frac{Z_\phi}{\sin \varphi_A} = 2Z_\phi. \quad (1.73)$$

Қозғалтқыштың токтары мен кернеулерінің векторлық диаграммасы 1.14, б суретте көрсетілген.

Конденсатордың реактивті қуаты:

$$P_c = \frac{U_k^2}{x_c} = \left(\frac{U_1}{\cos \varphi} \right)^2 \frac{1}{x_c} = \frac{2}{3} \frac{U_1^2}{Z_\phi}. \quad (1.74)$$

Алайда, қарастырылып отырған жағдайларда конденсатор орамасындағы ток үш фазалы асинхронды қозғалтқыштың номиналды мәнінен $\sqrt{3}$ есе асады, бұл машинаның жылыту жағдайына сәйкес қолайсыз. Сондықтан конденсаторлық қозғалтқыштың номиналды қуаты үшін үш фазалы қозғалтқыштың номиналды қуатының 70...85% - на тең қуат қабылданады. Бұл жағдайда айналмалы өріс эллиптикалық сипатқа ие.

Бұл жағдайда өте жоғары жүктеме қабілетіне қол жеткізіледі. Бір фазалы режимдегі қозғалтқыштың максималды моментінің еселігі 2,2...2,3 аралығында, ал максималды іске қосу моментінің еселігі 0,4...0,75 аралығында болады.

Шеңберге жақын өрісті қамтамасыз ететін сыйымдылықты $P_A = P_B$ орамдар қуатының теңдігімен және төмендегі шартпен тәжірибе түрде таңдауға болады:

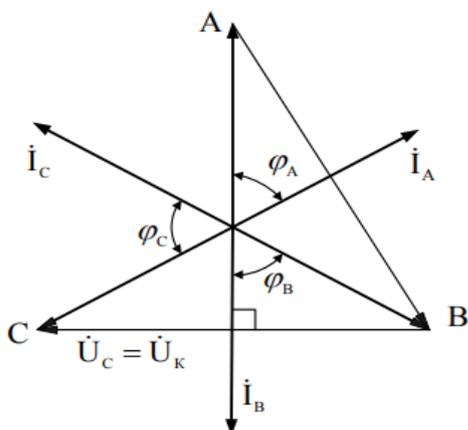
$$\frac{I_B}{I_A} = \frac{W_A}{W_B} = k = \sqrt{3}. \quad (1.75)$$

Шамамен ол келесідей анықталады:

$$C = \frac{3 \cdot 10^6 I_\phi}{4\pi f U_\phi (\sqrt{3} \cos\phi + \sin\phi)}, \text{ мФ}. \quad (1.76)$$

мұндағы U_ϕ , I_ϕ , $\cos\phi$ - номиналды фазалық кернеулер және үш фазалы қозғалтқыш тогы, қуат коэффициенті.

Орамдарды симметриялы жұлдызша жалғағанда (1.20, 3 сурет) айналмалы өріс фазалық орамалар арқылы өтетін токтар үш фазалы симметриялы ток жүйесін құрған жағдайда пайда болады. Бұл жағдайда кернеулер мен токтардың векторлық диаграммасы 1.21 суретте көрсетілген. Фазалардағы токтар мен кернеулер арасындағы фазалық ығысу $\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = 60^\circ$ болуы керек, өйткені фазадағы ток векторы конденсатордағы U_k кернеу векторына перпендикуляр, бұл үш фазалы симметриялы режимдегі қозғалтқыштың $\cos\phi = 0,5$ болатын айналу жиілігіне сәйкес келеді. Бұл жағдайда конденсатордың кернеуі желінің кернеуіне тең $U_k = U_C = U$.



1.21 сурет - Статор фазаларын жұлдызша қосқандағы бір фазалы желімен жұмыс істейтін үш фазалы қозғалтқыштың симметриялы режиміне арналған токтар мен кернеулердің векторлық диаграммасы

Конденсатордың сыйымдылық кедергісі:

$$x_c = \frac{U_k}{I_B} = \frac{U_\phi \sqrt{3}}{I_B} = Z_\phi \sqrt{3}, \quad (1.77)$$

Оның реактивті қуаты:

$$P_c = \frac{U_k^2}{k_c} = \frac{U^2}{Z_\phi \sqrt{3}}. \quad (1.78)$$

Бұл алдыңғы жағдайға қарағанда біршама аз.

Көрсетілген жағдайларда қозғалтқыш бір фазалы режимде үш фазалы қуаттағыдай қуатты бере алады. Алайда, бір фазалы режимде оның шамадан тыс жүктеме қабілеті жеткіліксіз, осыған байланысты бұл режимдегі қозғалтқыштың номиналды қуаты, алдыңғы жағдайдағыдай, үш фазалы қозғалтқыштың номиналды қуатының 70...85% - на тең қуат ретінде қабылданады.

1.3 Асинхронды атқарушы қозғалтқыштар

1.3.1 Атқарушы микроқозғалтқыштар туралы жалпы мәліметтер

Атқарушы немесе басқарылатын қозғалтқыштар басқару кернеуінің амплитудасын немесе фазасын механикалық қозғалысқа – айналу бұрышына (бұрыштық айналу жиілігі) түрлендіруге арналған электр қозғалтқыштары деп аталады.

Атқарушы қозғалтқыштардың сипаттамалары оларға автоматты басқару жүйелерінің элементтері ретінде қойылатын нақты талаптарды қанағаттандыруы керек. Осы талаптардың негізгілері:

- 1) Айналу жиілігін реттеудің кең ауқымдылығы және осы аралықтағы тұрақты жұмыс;
- 2) Механикалық және реттеу сипаттамаларының сызықтылығы;
- 3) Өздігінен жүрудің болмауы, яғни басқару сигналын алып тастағаннан кейін өздігінен айналу болмауы;
- 4) Жоғарғы тезәсерлілік;
- 5) Үлкен іске қосу моменті;
- 6) Басқарудың төменгі қуаты;
- 7) Іске қосылудың төменгі кернеуі (үйкеліс моментінің төменгі мәні);
- 8) Шағын өлшемдер мен салмақтан тұрады.

Энергетикалық көрсеткіштері атқарушы қозғалтқыштардың сапасын бағалау кезінде қарапайым электр машиналары үшін негізгі болып табылатын пайдалы қуат, ПӘК, $\cos\phi$ мәндері маңызды емес, өйткені көп жағдайда олар қысқа мерзімде жұмыс жасайды және номиналды режимде жұмыс істемейді.

Қуат кернеуінің сипаты бойынша атқарушы қозғалтқыштарды үшке бөлуге болады:

- а) атқарушы айнымалы ток қозғалтқыштары;
- б) атқарушы тұрақты ток қозғалтқыштары;
- в) қадамдық қозғалтқыштар.

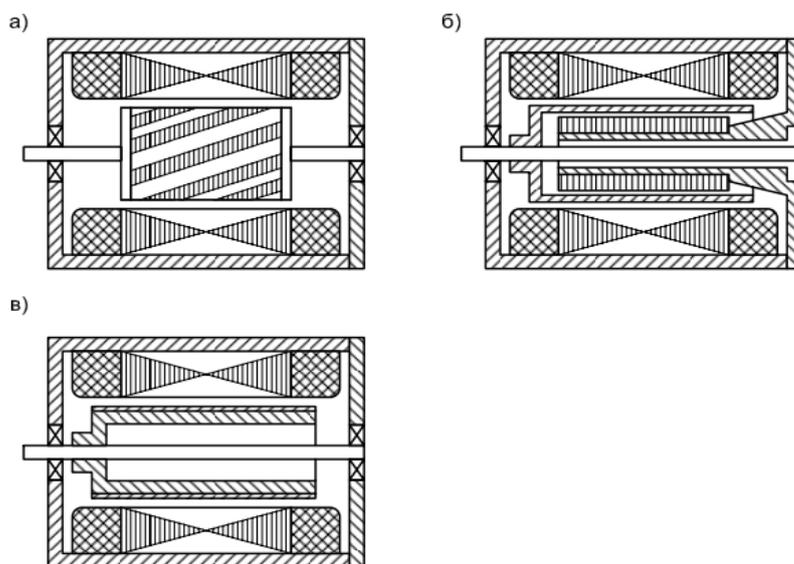
Автоматты басқарудың аспаптық жүйелерінде және қуаты аз бақылау жүйелерінде айнымалы токтың атқарушы қозғалтқыштары ретінде екі фазалы асинхронды атқарушы қозғалтқыштар кеңінен қолданылады.

1.3.2 Асинхронды атқарушы қозғалтқыштар құрылғысының ерекшеліктері. Механикалық сипаттамасы

Асинхронды атқарушы қозғалтқыштар (ААҚ) екі фазалы болып орындалады. Статордағы кеңістікте әдетте 90 электрлік градусқа жылжытылған екі орама орнатылады. Орамалардың бірі (В) қоздыру орамасы деп аталады, ал екіншісі (Б) басқару орамасы деп аталады. Қоздыру орамасы айнымалы ток желісіне қосылады, ал басқару орамасына шамасы немесе фазасы өзгертін U_6 басқару сигналы беріледі, ол сигнал яғни басқару кернеуі қозғалтқышты айналдыру қажет болған кезде ғана беріледі.

Ротордың құрылысына байланысты екі фазалы асинхронды қозғалтқыш келесі түрге бөлінеді:

- 1) «Тиін торлы» типті орамасы бар қысқа тұйықталған ротордан тұратын (21, а сурет);
- 2) Қуыс магниттік емес ротордан тұратын (21, б сурет);
- 3) Қуыс ферромагниттік мыс роторымен (21, в сурет);
- 4) Ферромагниттік ротормен.



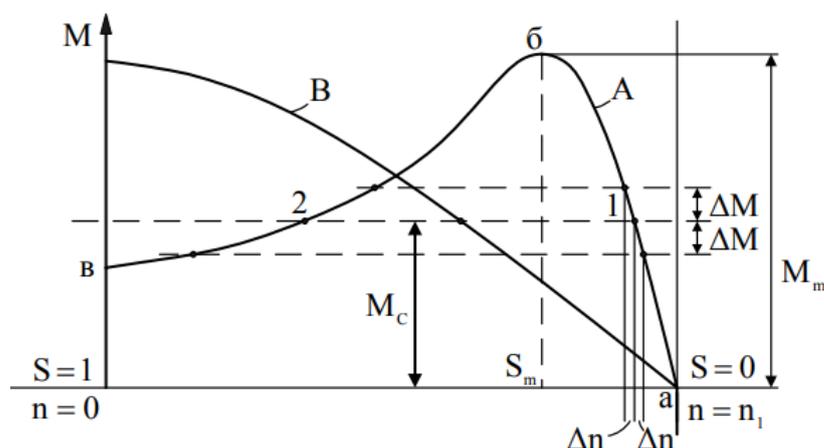
а – қысқа тұйықталған роторлы; б – қуыс роторлы; в - қуыс ферромагниттік мыс роторымен.

21 сурет – Атқарушы асинхронды қозғалтқыштың құрылысы

Ротордың құрылысына қарамастан, орындаушы асинхронды қозғалтқыштар үлкен активті кедергіден тұрады. Бұл қозғалтқыштардың критикалық сырғуының жалпы асинхронды қозғалтқыштардың критикалық сырғуынан айырмашылығы, әр уақытта 1-ден жоғары болады. Осының салдарынан синхрондыдан нөлге дейін (қысқа тұйықталу) айналу жиілігінің барлық аумағында қозғалтқыштың тұрақтылығы қамтамасыз етіледі, айналу жиілігін реттеу аймағы кеңейеді және өздігінен қозғалуы жойылады.

1.22 суретте салыстыру үшін қарапайым (А) және атқарушы (В) асинхронды қозғалтқыштардың механикалық сипаттамалары келтірілген.

Асинхронды қозғалтқыштың статикалық тұрақтылығы, яғни оның әр түрлі орнықты күйден кішігірім ауытқуы кезіндегі тұрақты жұмыс істеу қабілеті механикалық сипаттаманың түріне $M = f(n)$ немесе $M = f(s)$ тәуелділігіне байланысты болады.



1.22 сурет - Асинхронды атқарушы қозғалтқыштың механикалық сипаттамасы

Жүктеме моменті $M_{жс} = const$ болғанда және $M_{жс} = f(n)$ тәуелділігі абсцисса осіне параллель 1 мен 2 деген екі нүктеде асинхронды қозғалтқыштың А механикалық сипаттамасын қиып өтеді делік (1.22 сурет). Осы екі нүктеде де М қозғалтқышының электр магниттік моменті мен $M_{жс}$ жүктеме моментінің тұрақты жұмыс режиміне тән теңдігі орындалады, яғни $M = M_{жс}$. Дегенмен, қозғалтқыш тек 1-ші нүктеде тұрақты жұмыс істейді. Сондықтан Δn айналу жиілігінің кездейсоқ жоғарылауы қозғалтқыш моментінің азаюына және қозғалтқыш 1-ші нүктеге оралатын шамадан тыс теріс $\Delta M = M_{жс} - M$ моментінің пайда болуына әкеледі. Δn айналу жиілігінің кездейсоқ азаюы шамадан тыс оң $\Delta M = M - M_{жс}$ моменттің пайда болуына әкеледі, ол да қозғалтқышты 1-ші нүктеге қайтарады.

Машина 2-ші нүктеде жұмыс істегенде, айналу жиілігінің кез-келген кездейсоқ өзгеруі жылдамдықтың одан әрі өзгеруіне ықпал ететін артық моменттің пайда болуына әкеледі және қозғалтқыш 1-ші нүктеге өтеді немесе тоқтайды.

Жұмыстың статикалық тұрақтылығының шартын келесідей жазуға болады:

$$\frac{dM_{ж}}{dn} > \frac{dM}{dn}. \quad (1.79)$$

Бұл шарт тек механикалық сипаттағы *аб* аймағында орындалады, соның арқасында бұл аймақ тұрақты жұмыс тармағы деп аталады. *бв* аумағы тұрақсыз жұмыс тармағы болып табылады.

Асинхронды қозғалтқыштың тұрақты жұмысына сәйкес келетін айналу жиілігінің аумағын ротордың активті кедергісін арттыру арқылы кеңейтуге болады. Бұл кедергінің жоғарылауымен механикалық сипаттама деформацияланады, оның максимумы төмен жылдамдықтарға (үлкен сырғуларға) ауысады және тұрақты жұмыс аймағы жоғарылайды. Асинхронды атқарушы қозғалтқыштар үшін $s_m \geq 1$ болғанда критикалық сырғу кезінде механикалық сипаттама *В* сәйкес өзгереді (1.22 сурет) және қозғалтқыш нөлден синхрондыға дейінгі айналу жиілігінің өзгеруінің барлық аумағында тұрақты жұмыс істейді, яғни $n = 0$ -ден $n = n_1$ -ге дейін өзгереді.

1.3.3 Қосылу сұлбалары және басқару әдістері

Жоғарыда айтылғандай, статор орамалары 90 электр градусқа ығысқан екі фазалы асинхронды қозғалтқышта, айналмалы магнит өрісі орамаларға келтірілген кернеулердің фазасында ығысу болған кезде пайда болады. Асинхронды атқарушы қозғалтқышында бұл ығысу тікелей тізбек арқылы немесе фазаны ауыстыратын конденсаторды қоздыру орамасына тізбектей қосу арқылы орындалады.

Егер U_6 басқару кернеуі және берілген U_K қоздыру кернеуі үш фазалы симметриялы жүйені құраса, онда қозғалтқыштың ауа саңылауындағы магнит өрісі шеңберлі болады. Егер аталған кернеулердің симметриясы болмаса, магнит өрісі эллиптикалық болады. Қуаттың асимметрия дәрежесін өзгерту арқылы кері айналу өрісінің шамасын, яғни қозғалтқыштың айналу жылдамдығын өзгертуге болады. Асинхронды қозғалтқыштарды басқарудың үш әдісі осы принципке негізделген, ол әдістер:

- 1) Амплитудалық басқару;
- 2) Фазалық басқару;
- 3) Амплитудалық-фазалық басқару.

Амплитудалық басқару кезінде (1.23, а сурет) қоздыру орамы $U_K = U_6 = \text{const}$ желіге қосылады. Басқару орамына U_6 кернеуі беріледі, ол қоздыру кернеуінен фаза және амплитуда бойынша 90° градусқа ығысады. Басқару кернеуінің шамасы сигналдың тиімді коэффициентімен сипатталады:

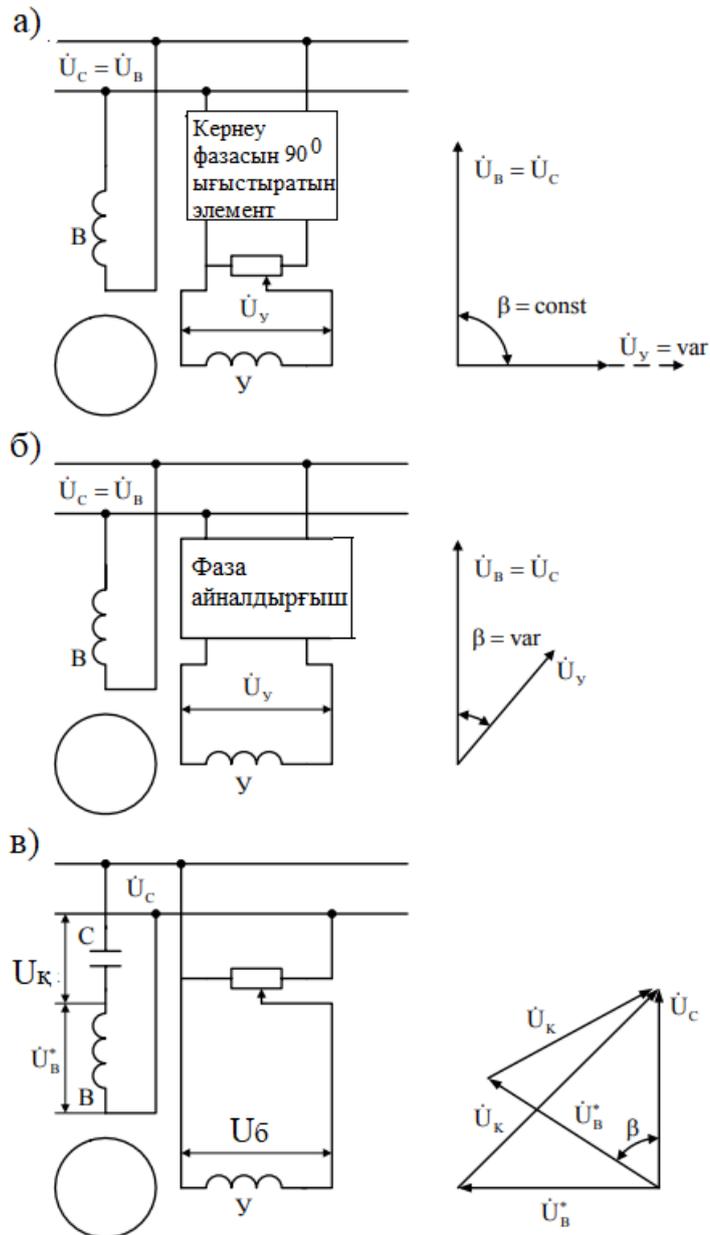
$$\alpha_э = \frac{U_6}{U_B} = \frac{U_6}{kU_K} = \frac{\alpha}{k}. \quad (1.80)$$

мұндағы $k = \frac{W_6}{W_K}$ тасымалдау коэффициенті;

α - сигналдың нақты коэффициенті.
 Амплитудалы басқару кезіндегі керу:

$$U_{\delta} = -j\alpha_3 U'_K = -j\alpha_3 U_K. \quad (1.81)$$

Егер $\alpha_3 = 1$ болса қозғалтқыштың ауа саңылауындағы айналмалы магнит өрісі шеңберлі болады. Осы өріске сәйкес келетін $U_{\delta 0}$ басқару кернеуі номиналды мәнде қабылданады. Егер $\alpha_3 \neq 1$ айналмалы магнит өрісі эллиптикалық сипатта болады.



а - амплитудалық басқару; б - фазалық басқару; в - амплитудалық-фазалық басқару.

1.23 сурет - Асинхронды атқарушы қозғалтқыштың қосылу сұлбасы

Фазалық басқару кезінде (1.23, б сурет) қоздыру орамы $U_6 = U_{60} = U'_k$ желі кернеуіне қосылады. Бұл жағдайда басқару басқару кернеуінің фазасын өзгерту арқылы орындалады яғни U_k және U_6 кернеулер арасында β ығысу болады.

Фазалық басқару кезіндегі кернеу:

$$U_6 = U'_k e^{-j\beta} = U'_ж e^{-j\beta} . \quad (1.82)$$

Бұл жағдайда сигнал коэффициенті ретінде $\sin\beta$ қабылдаймыз. Шеңбер түрінде айналу өрісі $\sin\beta = \pm 1$ ретінде қабылданады.

Амплитудалық-фазалық басқару басқару кернеуінің амплитудасы мен фазасын бір уақытта өзгерту арқылы жүзеге асырылады. Басқарудың бұл әдісі конденсатордың қоздыру орамасының тізбегіне қосылмай, басқару кернеуінің амплитудасы мен фазасын бір уақытта және дербес өзгертуге мүмкіндік беретін тізбекпен тікелей жүзеге асырылуы мүмкін. Бұл жағдайда:

$$U_6 = \alpha_3 U'_k e^{-j\beta} = \alpha U_{ж} e^{-j\beta} . \quad (1.83)$$

Амплитудалық-фазалық басқаруда фазаны ауыстыратын конденсаторды (1.23, в сурет) қоздыру орамасымен тізбектей қосу арқылы да жүзеге асыруға болады. Асинхронды атқарушы қозғалтқышты қосудың конденсаторлық сұлбасы басқару кернеуінің шамасын ғана өзгертуге мүмкіндік береді.

Сонымен қатар, ол қозу орамасына тікелей қолданылатын U_k^* кернеуінің шамасы мен фазасын өзгертеді. Басқару кернеуінің шамасы өзгерген кезде қоздыру орамасының тізбегіндегі ток өзгереді соның салдарынан $U_k = -jI_k X_c$ конденсатордағы кернеу мен $U_k^* = U_{ж} - U_k$ қоздыру орамасындағы кернеу де өзгереді.

Қарастырылып отырған жағдайда басқарудың номиналды кернеуі ретінде, әдетте, қозғалмайтын ротордағы айналмалы өріске сәйкес келетін U_{60} кернеуі қабылданады. Бұл жағдайда тиімді сигнал коэффициенті:

$$\alpha_{30} = \frac{U_{60}}{U_k} = \frac{U_{60}}{kU_{ж}} = \frac{\alpha_0}{k} . \quad (1.84)$$

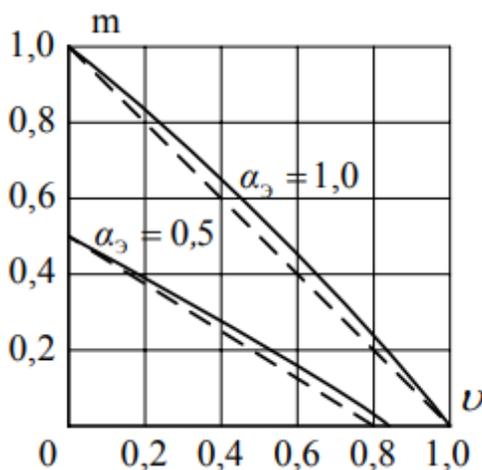
1.3.4 Амплитудалық басқарылатын асинхронды атқарушы қозғалтқыш

Механикалық сипаттама. Амплитудалық басқару кезінде ($\sin\beta = 1$) теңдеу:

$$m = \frac{1}{4} (1 + \alpha_3)^2 \frac{(r_{yk}^2 + x_{yk}^2)r_{3y1}}{(r_{y1}^2 + x_{y1}^2)r_{3yk}} - \frac{1}{4} (1 + \alpha_3)^2 \frac{(r_{yk}^2 + x_{yk}^2)r_{3y2}}{(r_{y1}^2 + x_{y1}^2)r_{3yk}} . \quad (1.85)$$

$$m = \alpha_3 - \frac{1 + \alpha_3^2}{2} \nu . \quad (1.86)$$

Осы теңдеулерге сәйкес салыстырмалы бірліктердегі нақты және идеалдандырылған қозғалтқыштардың механикалық сипаттамаларын құруға болады, яғни $m = f(v)$ тәуелдігі кезінде $\alpha_3 = \text{const}$. Сонымен қатар, асинхронды атқарушы қозғалтқыштың параметрлерін s және v нақты мәндерін ескере отырып анықталуы керек. Сигнал коэффициентінің $\alpha_3 = 1$ және $\alpha_3 = 0,5$ екі мәні үшін бұл сипаттамалар 1.24 суретте көрсетілген.



1.24 сурет - Амплитудалық басқару кезіндегі асинхронды атқарушы қозғалтқыштың механикалық сипаттамалары

Нақты қозғалтқыш үшін механикалық сипаттамалар түзу сызықтармен көрсетілген, ал идеалдандырылған қозғалтқыш үшін үзік сызықтармен бейнеленген.

Нақты қозғалтқыш үшін бұл сипаттама суретте түзу сызықтармен көрсетілген, ал идеалдандырылған сызықтар үшін үзік сызықтармен бейнеленген.

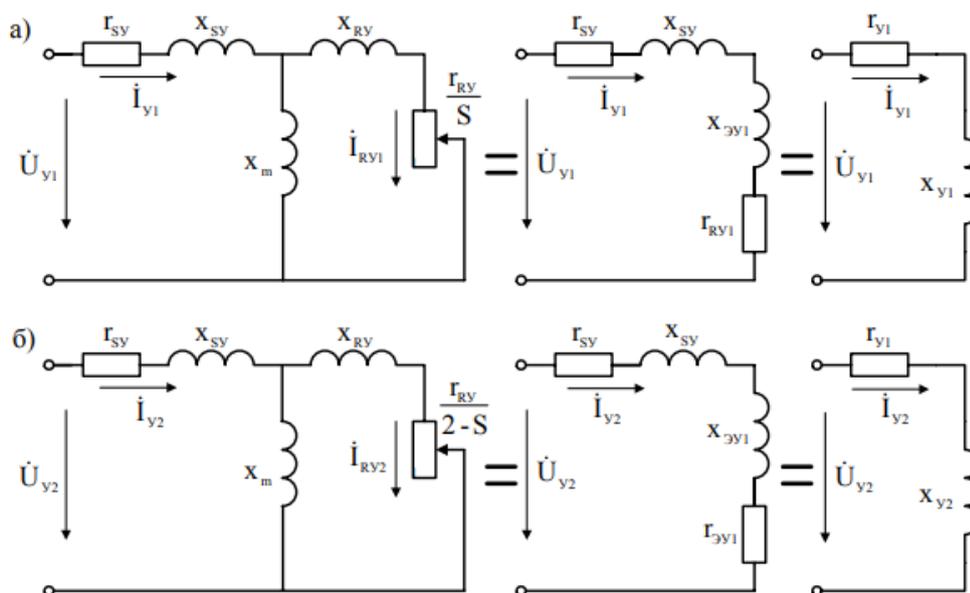
Идеалдандырылған қозғалтқыштың механикалық сипаттамасын екі нүкте арқылы тұрғызуға болады:

- 1) Қысқа тұйықталу нүктесі – $v = 0, m = \alpha_3$;
- 2) Идеалды бос жүріс нүктесі - $m = 0; v_6 = \frac{2\alpha_3}{1+\alpha_3^2}$.

α_3 әр түрлі мәндеріне сәйкес келетін механикалық сипаттамалар параллель емес: α_3 жоғарылаған сайын олардың көлбеуі артады. Нақты атқарушы қозғалтқыштың механикалық сипаттамалары сызықты емес, бұл машина параметрлерінің әсерімен түсіндіріледі.

$\alpha_3 \neq 1, \alpha_3 = 0,5$ болғанда идеалдандырылған қозғалтқышта идеалды бос жүріс жиілігі синхрондыдан төмен болады. Бұл жағдайдың болуы кері токтардың әсерінен туындайды. Синхронды айналу жиілігі кезінде ($v_6 = 1, s = 0$) орынбасу сұлбасының (1.25, а сурет) ротор тізбегіндегі тікелей әсер ететін токтар үшін ротор тізбегі ажыратылған күйде болады, тікелей өрістің айналу моменті нөлге тең болады. Кері тізбектілік токтары үшін ротор тізбегінің орынбасу сұлбасы (1.25, б сурет) тұйықталған болып келеді, кері өрістің

моменті нөлге тең емес. Соңында қозғалтқыш роторына тежелу әсер ететіндіктен $u_6 > 1$ болғанда механикалық сипаттама нөл арқылы өтеді (1.24 сурет). Бұл жағдайда тікелей және кері бағыттағы моменттер бір бірімен теңеседі. Нақты қозғалтқышта статор орамасының кедергісінің әсерінен кері тізбектегі токтардың азаюына байланысты кері өрістегі момент азаяды және механикалық сипаттама идеалдандырылған қозғалтқышқа қарағанда біршама үлкен айналу жиілігімен нөл арқылы өтеді.



а - түзу тізбектілік үшін; б - кері тізбектілік үшін.

1.25 сурет - Асинхронды атқарушы қозғалтқыштардың орынбасу сұлбалары

Механикалық сипаттаманың сызықтық емес сипаты нақты механикалық сипаттаманың нақты режимі аймағындағы сызықтық тәуелділіктен ең үлкен ауытқу мәнімен бағаланады. $\alpha_3 \sin \beta = 1$ болған кезде айналмалы өріске сәйкес келетін механикалық сипаттама ең үлкен сызықтық емес бөліктен тұрады.

Реттеуші сипаттамалар. Амплитудалық басқарудағы асинхронды атқарушы қозғалтқыштың реттеу сипаттамалары біліктегі тұрақты кедергі моменті кезіндегі айналу жиілігінің α_3 сигнал (басқару кернеуі) коэффициентіне тәуелділігі, яғни $m = \text{const}$ кезіндегі $v = f(\alpha_3)$ тәуелділігі. Идеалдандырылған қозғалтқыш үшін:

$$v = \frac{2(\alpha_3 - m)}{1 + \alpha_3^2}. \quad (1.87)$$

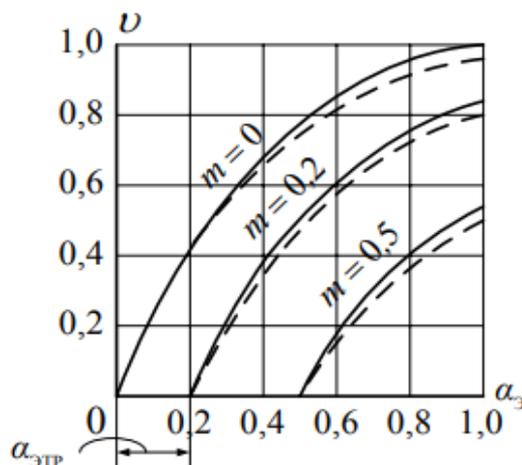
Идеалдандырылған қозғалтқыштың реттеуші сипаттамасы үш кедергі моментінің ($m = 0, m = 0,2, m = 0,5$) мәндері үшін 1.26 суретте үзік сызықпен көрсетілген. Нақты қозғалтқыштың реттеу сипаттамасы түзу сызықпен

көрсетілген. Екі жағдайда да сипаттамалар сызықты емес. Тек α_3 аз мәндерінде сызықты болады:

$$v' = 2(\alpha_3 - m). \quad (1.88)$$

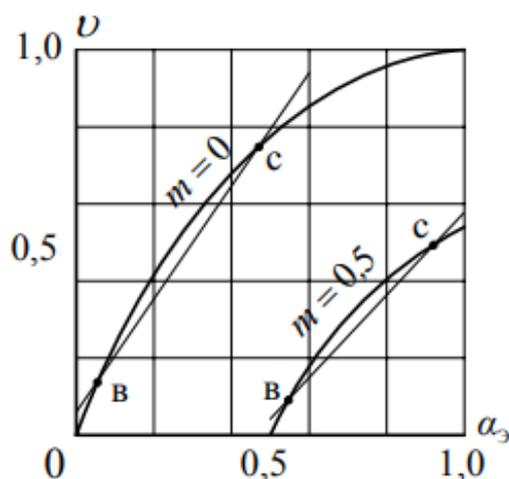
Реттеу сипаттамасының сызықты емес шамасы:

$$\Delta v = 2(\alpha_3 - m) - v. \quad (1.89)$$



1.26 сурет - Амплитудалық басқару кезінде асинхронды атқарушы қозғалтқыштың реттеу сипаттамалары

Іс жүзінде асинхронды атқарушы қозғалтқыштардың айналу жиілігін нөлден синхрондыға дейін реттеу өте сирек жүзеге асырылады. Сондықтан реттеудің сызықтық критерийі ретінде тікелей ω -ға дейінгі сызықтан v -ның ауытқуы қабылданады, ол α_3 өзгеруінің берілген ауағындағы нақты реттеу сипаттамасымен ауыстырылады (1.27 сурет).



1.27 сурет - Асинхронды атқарушы қозғалтқыштың реттеу сипаттамаларын сызықтандыру

Реттеу сипаттамасының абсцисса осімен қиылысу нүктесінің координаталардың басынан қашықтығы басқару сигналының минималды коэффициентін анықтайды, онда ротор білікке берілген қарсылық моментіне ие бола отырып, орнынан қозғалады. Оны жанасу сигналы деп, ал оған сәйкес кернеуді басқарудың жанасу кернеуі деп атайды.

1.3.5 Фазалық басқарылатын асинхронды атқарушы қозғалтқыш

Механикалық сипаттама. Фазалық басқару кезіндегі идеалданған қозғалтқыш моменті:

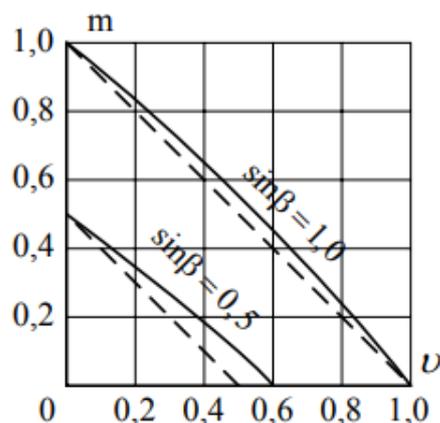
$$m = \sin\beta - v. \quad (1.90)$$

мұндағы $\sin\beta$ - сигнал коэффициенті.

Идеалданған асинхронды қозғалтқыштың механикалық сипаттамасы $\sin\beta = \text{const}$ болғанда айналу моментінің айналу жиілігіне қатынасы $m = f(v)$ арқылы тұрғызылады. Бұл сипаттамалар сызықты және оны екі нүкте арқылы тұрғызуға болады:

- а) қысқа тұйықталу нүктесі – $v = 0$, $m = \sin\beta$;
- б) идеалды бос жүріс нүктесі - $v_g = \sin\beta$, $m = 0$.

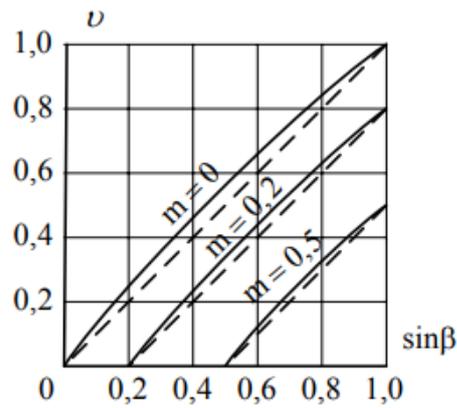
Идеалдандырылған қозғалтқыштың (үзік сызықты түзулер) және нақты қозғалтқыштың (түзу қисықтар) механикалық сипаттамалары 1.28 суретте келтірілген. Бұл жағдайда амплитудалық басқарудан айырмашылығы, идеалдандырылған қозғалтқыштың механикалық сипаттамалары бірдей көлбеу сызықтардан тұрады.



1.28 сурет - Фазалық басқарылатын асинхронды жетектің механикалық сипаттамалары

Реттемелік сипаттама. Реттемелік сипаттама $m = \text{const}$ болғанда $v = f(\sin\beta)$ тәуелдігі. Бұл жағдайда:

$$v = \sin\beta - m. \quad (1.91)$$



1.29 сурет - Асинхронды фазалық басқару қозғалтқышының реттеу сипаттамалары

Идеалдандырылған атқарушы асинхронды қозғалтқыштың реттемелік сипаттамасы 1.29 суретте үзік сызықпен көрсетілген, ал нақты атқарушы асинхронды қозғалтқыштың реттемелік сипаттамасы түзу сызықпен көрсетілген. Реттемелік сипаттамалар $m = 0; 0,2; 0,5$ тең кездері тұрғызылған.

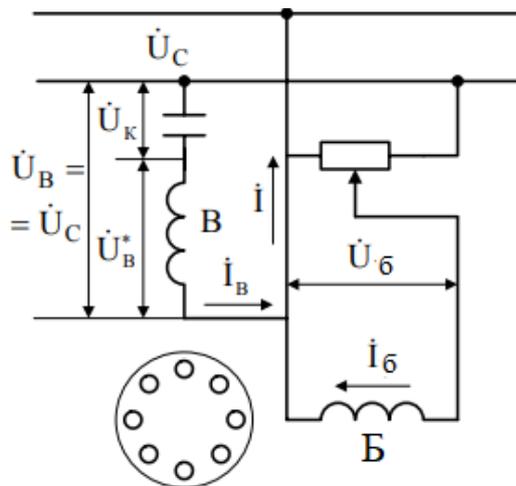
1.3.6 Конденсаторлық асинхронды атқарушы қозғалтқыш

Конденсаторлық асинхронды атқарушы қозғалтқышты басқару фазасы өзгермеген кездегі кернеу шамасын өзгерту арқылы орындалады (1.30 сурет). Оның кернеуі:

$$U_6 = \alpha_3 U_c' = \alpha_3 k U_c = \alpha U_c, \quad (1.92)$$

мұндағы α_3 - сигналдың тиімді коэффициенті;

$\alpha = \frac{U_6}{U_c} = \alpha_3 k$ - сигналдың нақты коэффициенті.



1.30 сурет - Конденсаторлық асинхронды атқарушы қозғалтқыштың сұлбасы

Бұл жағдайда басқару кернеуінің шамасы ғана өзгертіндіктен конденсаторлық асинхронды атқарушы қозғалтқыштың конденсаторлық қосылу сұлбасы амплитуда фазалық басқаруға жатады. Басқару кернеуінің шамасын өзгерткенде қоздыру орамы мен конденсатор арасындағы қоздыру тізбегінде кернеудің таралуы болады. В орамына келтірілген кернеу фазасы мен шамасы өзгереді.

Қарастырып отырған жағдайдың айналмалы өрісін алу шартын қарастырамыз. Айналмалы өріс кезінде кері өріс және кері қайтымды тогы болмайды, яғни $I_{\delta 2} = I_{\delta 2} = 0; I_{\delta 1} = I_{\delta}; I_{B1} = I_B = jkI_{\delta}$.

Онда басқару тізбегінің және қоздыру тізбегінің кернеуі:

$$\begin{aligned} U_{\delta} &= \alpha_0 U_c = I_{\delta} Z_{\delta} = I_{\delta} (r_{\delta} + jx_{\delta}); \\ U_c &= I_B Z_B = jkI_{\delta} (r_{\delta}^* + jx_{\delta}^* - jx_{c0}), \end{aligned} \quad (1.93)$$

мұндағы:

$$\alpha_0 = \frac{r_{\delta} + jx_{\delta}}{jk(r_{\delta}^* + jx_{\delta}^* - jx_{c0})}; \quad (1.94)$$

$$r_{\delta} + jx_{\delta} = j\alpha_0 k (r_{\delta}^* + jx_{\delta}^* - jx_{c0}); \quad (1.95)$$

Осы теңдеулердің нақты және жорамал бөліктерін теңестіріп келесі теңдеулер алынады:

$$x_{\delta} = \alpha_0 k r_{\delta}^* = \alpha_0 \frac{r_{\delta}}{k^2} k = \alpha_0 \frac{r_{\delta}}{k}; \quad (1.96)$$

$$r_{\delta} = \alpha_0 k x_{c0} - \alpha_0 k x_{\delta}^* = \alpha_0 k x_{c0} - \alpha_0 \frac{x_{\delta}}{k}; \quad (1.97)$$

мұндағы:

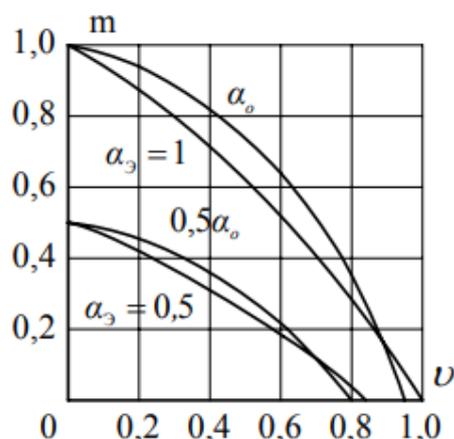
$$\alpha_0 = \frac{kx_{\delta}}{r_{\delta}} = k \operatorname{tg} \varphi_{\delta}; \quad k = \alpha_0 \operatorname{ctg} \varphi_{\delta}; \quad (1.98)$$

$$\begin{aligned} x_{c0} &= \frac{r_{\delta}}{\alpha_0 k} + \frac{x_{\delta}}{k^2} = \frac{r_{\delta}^2}{k^2 x_{\delta}} + \frac{r_{\delta}}{k^2} = \frac{x_{\delta}}{k^2} \left(\frac{r_{\delta}^2}{x_{\delta}^2} + 1 \right) = \frac{x_{\delta}}{k^2} (\operatorname{ctg}^2 \varphi_{\delta} + 1) = \\ &= \frac{x_{\delta}}{\alpha_0^2 \operatorname{ctg}^2 \varphi_{\delta}} \frac{1}{\sin^2 \varphi_{\delta}} = \frac{x_{\delta}}{\alpha_0^2 \cos^2 \varphi_{\delta}}; \end{aligned} \quad (1.99)$$

Конденсаторлық асинхронды қозғалтқыш, әдетте, $\nu = 0$ болғанда, дөңгелек айналмалы өріс іске қосылған кезде пайда болатындай етіп есептеледі. Басқа режимдерде өріс эллиптикалық болады.

Іске қосу кезінде дөңгелек өріске сәйкес келетін конденсатордың механикалық сипаттамалары 1.31 суретте көрсетілген. Салыстыруды орындау үшін онда амплитудалық басқарылатын асинхронды қозғалтқыштың бірнеше механикалық сипаттамалары келтірілген. Онда конденсаторлық асинхронды қозғалтқыштың механикалық сипаттамалары сызықты емес және

амплитудалық басқарылатын асинхронды қозғалтқыш сипаттамаларынан жоғары, айналу жиілігінің өзгеруінің кең ауқымында орналасқан.



1.31 сурет - Конденсаторлық атқарушы қозғалтқыштың және амплитудалық басқарылатын қозғалтқыштың механикалық сипаттамалары

Сонымен, айналу жиілігі артқан сайын қозу тізбегіндегі кернеу конденсатор мен ораманың арасында қайта бөлінеді, ал орамдағы кернеу айтарлықтай артады. Бұл жағдайда түзу өріс артады, айналу өрісі эллиптикалық болады.

Конденсаторлық асинхронды қозғалтқыштың бос жүріс жылдамдығы бірден төмен болады. Бұл кері өрістің айтарлықтай әсеріне байланысты төмендейді.

Конденсаторлық асинхронды қозғалтқыштың кемшілігі төменгі айналу жиілігінде тұрақсыз жұмыс істеуі болып табылады. Моменттің шамалы өзгеруі жылдамдықтың айтарлықтай өзгеруіне әкеледі. Сонымен қатар, іске қосу кезінде дөңгелек өріске сәйкес келетін басқару кернеуі номиналды ретінде қабылданады. Конденсаторлық асинхронды қозғалтқыштың артықшылықтарына айналу жиілігі артқан сайын басқару қуатының төмендеуін жатқызуға болады.

Бақылау сұрақтары

1.1 Екі фазалы асимметриялық машинада айналмалы өрісті алу шарттары.

1.2 Екі фазалы асимметриялық асинхронды қозғалтқыштардың жұмысын талдауға қатысты симметриялық құрылымдар әдісі.

1.3 бір фазалы асинхронды микроқозғалтқыштар.

1.4 Асинхронды атқарушы қозғалтқыштар құрылысының ерекшеліктері. Механикалық сипаттамасы.

1.5 Асинхронды атқарушы қозғалтқыштың механикалық сипаттамасы.

1.6 Асинхронды атқарушы қозғалтқыштың қосылу сұлбасы.

1.7 Асинхронды атқарушы қозғалтқыштың басқару әдістері.

1.8 Амплитудалық басқару кезінде асинхронды атқарушы қозғалтқыштың реттеу сипаттамалары.

2 Айнымалы және тұрақты токты тахогенераторлар

2.1 Асинхронды қуыс роторлы тахогенератор құрылысы және жұмыс принципі

Тахогенератор дегеніміз механикалық қозғалысты (біліктің айналуын) электр сигналына (шығыс кернеуіне) түрлендіруге арналған төменгі қуатты электр машинасы (ТҚЭМ). Тахогенератордың оның қасиеттерін анықтайтын негізгі сипаттамасы шығыс сипаттамасы, ол сипаттама шығыс кернеуінің айналу жиілігіне тәуелділігімен $U = f(n)$ немесе $U = f(\Omega)$ сипатталады.

Нақты жағдайда (бос жүрісте):

$$U = E = C_e \Phi n = C_e' \Phi \Omega = cn = c' \Omega = c' \frac{d\alpha}{dt}, \quad (2.1)$$

мұндағы C_e , C_e' , c , c' - тұрақты коэффициенттер. Бос жүріс кезінде $\Phi = \text{const}$.

Тахогенераторлар келесі функцияларды орындауға қолданылады:

- айналу жиілігін өлшеуге;
- автоматты реттеу сұлбаларында айналу жиілігі бойынша кері байланысты жүзеге асыру үшін;
- автоматты жүйелердегі тербелістерді демпферлеу үшін;
- электрлік дифференциалдауды жүзеге асыру үшін $U = c' \frac{d\alpha}{dt}$;
- электр интеграциясын жүзеге асыру үшін:

$$\alpha = \frac{1}{c'} \int U dt. \quad (2.2)$$

Нақты жағдайларда тахогенератор (ТГ) орамаларында ағынға әсер ететін токтар өтеді. Сонымен қатар, бұл токтар орамалардағы кернеудің төмендеуіне әкеледі. Бұл жағдайда шығыс сипаттамасы сызықтық тәуелділіктен өзгеше болады, бұл амплитудалық қатенің пайда болуына әкеледі. Асинхронды тахогенераторда фазалық қателікпен, яғни айналу жиілігі өзгерген кезде шығыс кернеуінің фазасының өзгеруін ескеру керек.

Тахогенераторлар ток түрі бойынша тұрақты және айнымалы ток тахогенераторларға бөлінеді. Автоматика тізбектеріндегі айнымалы ток тахогенераторларының ішінен қуыс роторлы асинхронды тахогенераторлар (ҚРАТ) ең көп қолданылды. Олардың құрылысы жоғарыда қарастырылған 1.27, б суретіндегі машинаның құрылысына ұқсас болып келеді. Тахогенератордың статорында 90 эл.градуска кеңістікте ығысқан екі орамасы болады. Орамалардың бірі – қоздыру орамасы (В), ал екіншісі - генератор (Г) орамасы деп аталады. Әдетте, олар төрт полюсті түрде орындалады.

Орамалардың өзара орналасуына байланысты қуыс роторлы тахогенератор келесі түрлерге ажыратылады:

а) сыртқы статордағы орамалардың орналасуымен;

б) ішкі статордағы орамалардың орналасуымен;

в) орамалардың бөлек орналасуымен. Соңғы нұсқа ең қолайлы, өйткені бұл жағдайда орамалардың осьтері арасында идеалды жағдайда 90 эл.градусқа дәлірек ығыстыру мақсатында ішкі статорды сыртқы статорға қатысты бұру мүмкіндігі бар.

Сыртқы және ішкі статордың арасында магниттік емес алшақтық бар, онда қуыс ротор үлкен активті кедергісі бар материалдан (тұрақты, манганин, фосфорлы қола және т. б.) жасалған стакан түрінде орналастырылады.

Қуыс роторлы асинхронды тахогенератордың әрекет ету принципін түсіндірген кезде роторды қарапайым өзектерден тұрады деп қарастырамыз (2.1, а сурет). $n = 0$ болғанда, қоздыру орамасын U_k кернеуіне қосқанда, осы ораманың I_k тогы ораманың осі бойымен әрекет ететін Φ_d лүпілдік ағынды тудырады. Бұл ағын ротор өзектерінде трансформаторлық ЭҚК-ін E_d тудырады:

$$E_d = \pi\sqrt{2}k_{Rop}W_Rf_1\Phi_d \sim f_1\Phi_d, \quad (2.3)$$

мұндағы k_{Rop} – ротор орамының коэффициенті;

W_R – орамның тармақтар саны.

E_d ЭҚК әсерінен ротордың қарапайым өзектерінде I_d токтары өтеді, олардың магниттелу әрекеті (кез-келген трансформатордағыдай) I_k қоздыру орамасының жоғарылайтын тогымен өтеледі. Осылайша, I_k және I_d токтарының МҚК-мен бірлескен әрекеті нәтижесінде Φ_d нәтижелік бойлық ағыны пайда болады. Ротордың қарапайым өзектердің қимасын бейнелейтін ЭҚК-ің E_d және I_d токтарының бағыттары жоғарғы жартылай шеңберде көрсетілген (2.1, а сурет).

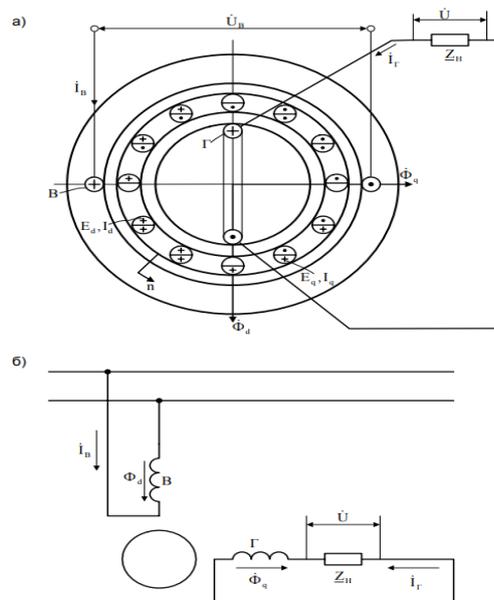
Ротор айналғанда ($n \neq 0$) қарапайым өзектер Φ_d магнит ағымы арқылы өтеді, онда трансформаторлық ЭҚК-нен басқа айналу ЭҚК E_d пайда болады:

$$E_d = \frac{C_e}{\sqrt{2}}\Phi_d n, \quad (2.4)$$

ЭҚК E_d әсерінен I_d тогы пайда болады. Нәтижесінде ротордағы үлкен активті кедергінің болуының салдарынан I_d токтарының бағыты E_q бағытымен сәйкес келеді. E_q және I_q бағыттары өзектердің қималарын бейнелейтін шеңберлердің төменгі жартысында көрсетілген. Φ_d ағыны f_l желісінің жиілігімен пульсацияланатындықтан, осыған сәйкес E_q және I_q бірдей жиілікте пульсацияланады. Соңғысы генератор орамасының осі бойымен әрекет ететін Φ_q пульсациялық ағынын тудырады. Бұл ағын бос жүріс кезінде генератор орамында трансформаторлық ЭҚК тудырады:

$$E_T = \pi\sqrt{2}W_Tk_{r.op}f_1\Phi_q = C_{e1}f_1\Phi_q = C_{e2}f_1\Phi_q n, \quad (2.5)$$

мұндағы W_T және $k_{r.op}$ – тармақтар саны және орам коэффициенті.



а - өзектердің соңғы саны бар қысқа тұйықталған орам түріндегі қуыс роторды бейнелейтін көлденең қима; б-асинхронды тахогенератордың принципіалдық сұлбасы.

2.1 сурет – Қуыс роторлы асинхронды тахогенератор

Жүктеме кезінде генератор орамындағы кернеу:

$$U = E_{\Gamma} - I_{\Gamma} Z_{\Gamma} = I_{\Gamma} Z_{H}, \quad (2.6)$$

Сонымен қатар көлденең ағым I_q және I_f токтардың МҚК әсерінен пайда болады.

Нәтижесінде шығыс орамасының ЭҚК-і желі жиілігіне және АТ-ң айналу жылдамдығына пропорционал болады. Мұндай тұжырым Φ_d ағыны айналу жиілігіне тәуелді емес деген болжам бойынша идеалдандырылған тахогенераторға қатысты.

2.1.1 Айнымалы ток тахогенераторының шығыстық сипаттамасы

Механикалық айнарудың электр сигналына түрленуі тахогенератор білігінің айналу жылдамдығы мен оның шығыс орамында индукцияланатын ЭҚК-тің (тұрақты магнит ағыны болғанда) арасындағы пропорционалдық заңдылығына бағынуы тиіс:

$$E = c\Omega = c \frac{d\alpha}{dt}, \quad (2.7)$$

мұндағы Ω - біліктің бұрыштық айналу жылдамдығы, бұрылу бұрышы α -ның бірінші реттік туындысына тең.

(2.7) теңдеу идеалды тахогенератордың шығыс сипаттамасын анықтауға арналған. Тахогенераторды есептегіш құрылғыларда электрлік дифференциалдаушы, сигналдарды жеделдетуші және баяулатушы, сондай-ақ

автоматты сұлбаның жалпылама координаттарына сәйкес келетін уақыт бойынша туындысы ретінде қолдануға болады.

Іс жүзінде тахогенераторды нақты құрылғыларда пайдаланғанда оның орамалары арқылы ток жүреді, ол кернеуді төмендетеді және бос жүріс ағымымен салыстырғанда ағын шамасын өзгертуге әсер ететін индукциаланатын E ЭҚК-і электр магниттік әсерді тудырады. Осының әсерінен біріншіден (2.7) теңдеуге енгізілген масштабтық «с» коэффициент шамасы, екіншіден, магнит ағынының тұрақтылық шарты сақталмайтындықтан «с» коэффициент тұрақты болмайды және нәтижесінде E -ің Ω -ға тәуелді шығыс сипаттамасы сызықтық тәуелдігін жоғалтады. Осы екі құбылыс жоғарлаған сайын тахогенератордың шығыс орамасы арқылы өтетін токтың шамасы соғұрлым жоғары болады, яғни сыртқы ағымдағы кедергі шамасы аз болған сайын, айналу жылдамдығы жоғары болады.

Егер шығыс орама машинаның айналмалы бөлігінде орналасқан болса, онда орама мен сыртқы тізбек арасына жылжымалы түйіспені (сақинаны немесе коллектор және щеткаларды) орналастыру керек, бұл да тахогенератордың шығын көзі болуы мүмкін.

Жүктелген тахогенератордың $U = f(\Omega)$ шығыс сипаттамасының дәлдігіне тұрақты сыртқы жүктеме кезінде машинаның қызуының салдарынан орам кедергілерінің өзгеруі ықпал етуі мүмкін.

Айнымалы ток тахогенераторында шығыс сипаттамасының көрсетілген қателіктері фазалық қателіктермен толықтырылады, яғни жұмыс режимі өзгерген кезде шығыс кернеуінің векторының фазасы да өзгереді.

Тахогенератордың қателігін азайту есептеу және технологиялық реттің бірқатар қиындықтарымен байланысты. Егер машина тек жеделдету және баяулату сигналдарын жасауға арналған болса, онда шығыс сипаттамасының сызықтықтан ауытқуы 2-4% дейін қанағаттандырылуы мүмкін және мұндай дәлдікке жету салыстырмалы түрде оңай. Есептеу құрылғыларында дифференциалды буын ретінде жұмыс істегенде, дәлдікке қойылатын талаптар бірнеше есе артады және көбінесе сызықтықтан ауытқу пайыздың оннан және жүзден бір бөлігінде ғана рұқсат етіледі. Қазіргі уақытта тиісті параметрлері мен құрылысын еске отырып айнымалы ток тахогенераторын құрастыруға болады және өндіріс технологиясы кезінде сызықтықтан ауытқуы (амплитудалық қателік) 0,01% құрауы керек, ал фазалық қателік $0,01^\circ$ - тан аспауы тиіс. Есептеу құрылғыларының сұлбаларында амплитудасы бойынша 0,3 - 0,4% және фазасы бойынша $0,5 - 1,0^\circ$ қателіктер қанағаттандырылуы керек.

Сызықты шығыс сипаттама мен шығыс кернеу фазасының тұрақтануынан бөлек тахогенераторға басқада негізгі талаптар қойылады, олар:

- а) радиобөгеттердің болмауы;
- б) шусыз жұмыс;
- в) құрылғының қарапайымдылығы;
- г) тасымалдау үшін сенімділіктің жоғарлығы;
- д) әсер етуі жылдам (аз электр механикалық тұрақты уақыт);
- е) шағын өлшемді және салмағы аз болуы керек.

2.2 Тұрақты ток тахогенераторлардың түрлері

Қізірге кезде айнымалы ток тахогенераторларымен қатар тұрақты ток машиналары да кең таралған. Құрылысы күрделі, коллектор мен щеткалар арасындағы жылжымалы тізбектің болуына, жоғары құнына, радиобөгеттен қорғаныс сүзгі құралдарының қажеттілігіне қарамастан, фазалық шығындардың мүлдем болмауын талап ететін жерлерде тұрақты ток тахогенераторы пайдаланылады. Сонымен қатар, мұнда, әртүрлі сипаттағы (активті, индуктивті, сыйымдылықты) шығыс кернеу шамасына және шығыс сипаттама пішініне әсер ететін жүктемелер болмайды.

Тұрақты магниттері бар генератор 2.2 суретте жеке бөлшек түрде көрсетілген. Сол жағындағы бөлік орама мен коллекторлы зәкір, ортасындағы бөлік сыртқы бөлігі (ішінде тұрақты магнит шығыңқы полюс түрінде көрсетілген), оң жағындағы бөлік щетка ұстағыш пен щетка бекітілен мойынтірек қалқаны көрсетілген.



2.2 сурет – Тұрақты магниттермен қоздырылатын тұрақты токты тахогенератордың бөлшектері

Тұрақты ток тахогенераторының екі түрі бар: тұрақты магнитпен қоздырылатын және тұрақты ток көзінен еріксіз электр магнитпен қоздырылатын.

Еріксіз электр магнитпен қоздырылған генератор құрылысы бойынша атқарушы тұрақты ток қозғалтқыштан айырмашылығы жоқ.

Тұрақты магнитті тахогенератордың маңызды артықшылығына қоздыру үшін энергия көзі болу қажетті еместігі және қызудың аз әсері жатады. Уақыт өте келе тұрақты магниттердің магниттік қасиеттерінің өзгеруі арнайы магниттік шунттардың (полюстер арасындағы жұқа қосқыштар) көмегімен өтелуі мүмкін. Алайда, альнико, магнико және т. б. типтегі заманауи магниттік қорытпалар ұзақ уақыт бойы магниттік қасиеттердің өте жоғары тұрақтылығын сақтайды.

Электр магниттік тәуелсіз қозуы бар тахогенераторларда шығыс кернеуінің шамасына желінің полюстерін қоректендіретін кернеудің ауытқуы айтарлықтай әсер етеді, өйткені бұл жағдайда қозу ағынының тұрақтылығы жоғалады. Алайда, кейбір жағдайларда, егер тахогенератордың жүктеме тізбегінде масштабты коэффициенті қоздырғыш кернеудің тербелістерінің әсерінен өзгертін элементтер болса, бұл қасиет оң болуы мүмкін.

2.2.1 Тұрақты ток тахогенераторының шықпалық сипаттамалары

Айнымалы ток тахогенераторларына ұқсас зәкірдің электр қозғаушы күші (кіріс ЭҚК) айналу жылдамдығының тұрақты қоздыру ағымына пропорционалды:

$$E_0 = c' n = c \Omega. \quad (2.8)$$

Бұл сызықтық байланыс 2.3 суретте көрсетілген ($R_{ж} = \infty$).



2.3 сурет - Шығыс сипаттамалары

Егер ағын бастапқы шамасын сақтаған болса, онда машинаның сыртқы кедергіге жүктелуі кезінде қысқыштағы кернеу төмендейді:

$$U = E_0 - I r_a, \quad (2.9)$$

мұндағы I - жүктеме тогы;

r_a - коллектор мен щеткалар арасындағы өтпелі байланыс кедергісін қамтитын зәкір тізбегінің кедергісі.

Ток:

$$I = \frac{U}{R_{ж}}, \quad (2.10)$$

мұндағы $R_{ж}$ – сыртқы жүктеме кедергісі, онда:

$$U = E_0 - U \frac{r_a}{R_{ж}}, \quad (2.11)$$

мұндағы:

$$U = \frac{E_0}{1 + \frac{r_a}{R_{ж}}} = \frac{c'}{1 + \frac{r_a}{R_{ж}}} n.$$

r_a және $R_{ж}$ тұрақты болғанда:

$$U = c'' n. \quad (2.12)$$

Бұл жердегі жаңа масштабтық коэффициент жоғары болған сайын сыртқы жүктеме кедергісі жоғары болады:

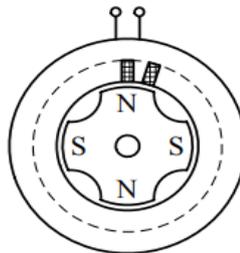
$$c'' = \frac{c'}{1 + \frac{r_a}{R_{ж}}} = c' \frac{R_n}{R_{ж} + r_a} \quad (2.13)$$

2.3 Синхронды тахогенератор

Синхронды тахогенератор құрылымы бойынша тұрақты магнитпен жұлдызша түрінде жасалған айқын полюсті роторы бар бір фазалы (кейде үш фазалы) төменгі қуатты синхронды генераторға ұқсас болып келеді (1.7 сурет). Статор орамымен ротор айналғанда онда ЭҚК индукцияланады (2.4 сурет):

$$E = \pi\sqrt{2}k_{об1}fW\Phi = \pi\sqrt{2}k_{об1}\frac{p_n}{60}W\Phi = cn, \quad (2.14)$$

Бұл жағдайда E ЭҚК-і n айналу жиілігінің функциясы болғандықтан, бұл машинаны автоматты құрылғыларда пайдалану кезінде қиындық туындайды. Айналу жиілігі өзгерген кезде тахогенератордың өзіндегі реактивті кедергі және ол жұмыс істейтін жүктеме де өзгереді, бұл шығыс сипаттамасының бұрмалануына және қателіктердің пайда болуына әкеледі. Сонымен қатар, резонанстық құбылыстар болуы мүмкін. Жиілік принципіне жұмыс істейтін кейбір сұлбаларда ғана n айналу жиілігінің тұрақсыздығы синхронды тахогенератордың оң сапасы болып келеді.



2.4 сурет - Синхронды тахогенератор құрылымы

Синхронды тахогенератор әртүрлі жүйенің айналу жылдамдығын тікелей өлшеу үшін индикатор тахометрі ретінде ғана кеңінен қолданылды.

Бақылау сұрақтары

- 1.1 Асинхронды қуыс роторлы тахогенератор құрылысы және жұмыс принципі.
- 1.2 Айнымалы ток тахогенераторының шығыстық сипаттамасы.
- 1.3 Тұрақты ток тахогенераторының шықпалық сипаттамалары.
- 1.4 Синхронды тахогенератор құрылымы.

3 Синхронды байланыстың индукциялық жүйесінің микромашиналары

3.1 Тағайындалуы, қасиеттері және қолданылу аймақтары

Синхронды байланыстың индукциялық жүйесінің қасиеттерін сипаттайтын негізгі көрсеткіштері тұрақты жиіліктен тұратын айнымалы токтың желісімен қоректенуі және біліктің бір айналымында өзіндік синхрондалуы. Бұл жүйенің артықшылықтары:

- ұшқынды коммутацияның, яғни жүйе жұмыс істеп тұрғанда датчиктің қоректену тізбегінің ажырауының болмауы;
- келісілген режимде ротор датчигі мен қабылдағыштың арасындағы қателік бұрышын азайтуды қамтамасыз ететін жоғарғы дәлдік (төменгі класс машиналары үшін $2,5^\circ$ аз емес);
- датчик бұрылысын қабылдағышпен баяу өңдеу;
- түйіспесіз типті датчик пен қабылдағыш қондырғысының жұмысқа қаблеттігі;
- датчик пен қабылдағыштың бір типтілігі.

Осы артықшылықтардың болуы қазіргі уақытта синхронды байланыс индукциялық жүйелерінің көптеп таралуына ықпал етті және айнымалы жиілікпен жұмыс істейтін құрылғылардың қолданысын төмендетті.

Индукциялық жүйелерде датчик және қабылдағыштар ретінде қолданылатын микромашиналар сельсин деп аталады (ағылшынның self-synchro – nizing сөзінің бастапқы буындары), олар өздігінен синхрондалатын қасиетке ие.

Негізінен сельсин қондырғысы, ротордың айналуы кезінде статор мен ротор орамаларының арасында өзара индуктивтіліктің бір қалыпты өзгерісі пайда болатын айнымалы трансформаторға ұқсас болады. Датчик орамдарындағы ЭҚК шамаларының немесе фазаларының өзгерістері қабылдағышта өзгерістерді туғызады, осының салдарынан нәтижесінде өңдеулер орындалады. Өзара байланыс сызығы арқылы жалғанған датчик орамасы мен қабылдағыш синхрондау орамасы деп аталады, ал қоректену көзіне жалғанған және машинадағы магниттік ағын тудыруға арналған орама қоздыру орамасы деп аталады.

Синхронды байланыстың индукциялық жүйесін үш фазалы және бір фазалы деп екіге бөлуге болады.

Үш фазалы сельсиндердің статоры мен роторы үлестірілген үш фазалы орамасы бар кәдімгі асинхронды қозғалтқыштан еш айырмашылығы жоқ. Ротор орамасын (бұл жағдайда синхрондау орамы) байланыс сызығына жалғау үшін оның ұштары машинаның сыртқы бөлігіндегі қозғалмайтын қысқыштармен жалғанған щеткаларға қосылған түйіспелі сақиналарға енгізіледі.

Үш фазалы сельсиндер тек қана бір-бірінен ажыратылған екі қозғалтқыштың синхронды айналуын қажет ететін жағдайда, «электрлік білік»

деп аталатын салыстырмалы түрде үлкен қуатты жүйелерде кең таралған (көпірлерді ажырату механизмдері, қағаз жасайтын машиналар және т.б.).

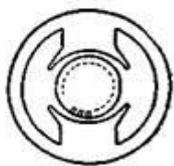
Бір фазалы сельсиндердің қоздыру орамалары бір фазалы желімен қоректенеді. Синхрондау орамалары көп жағдайда үш фазалы орама түрінде жасалады, яғни үш 120° ығысқан жұлдызша жалғанған жеке орамалардан тұрады. Синхрондау орамасы бір өсті орама түрінде жасалған сельсиндер сирек қолданылады.

Жүйенің сипаттамасына байланысты орамның статорда немесе роторда орналасқаны маңызды емес, бірақ пайдалану тұрғысынан маңызды. Егер қоздыру орамасын роторға орналастырсақ түйіспелі сақиналар саны екіге дейін төмендейді, яғни пайдалану сенімділігіне қатысты әлсіз түйіндер саны төмендейді. Дегенмен мұнда щетка мен сақина арқылы үздіксіз қоздыру тогы өтетін болады, қоздырушы ток ұзақ уақыт жүйе арқылы өткен кезде сақиналар мен щеткаларды күйдіріп жүберуі мүмкін. Осы кезде роторға синхронды ораманы орналастырсақ, сақиналар саны үшке дейін өседі және жүйенің жұмысы индикатор режиміне өтеді. Индикатор режимінде ток щеткалар арқылы қайта өңдеу кезінде ғана өтеді және тепе-теңдік жасауға қолайлылық тудырады. Сондықтан сельсиндердің көбі статорында қоздыру орамасы бар етіп жасалынады.

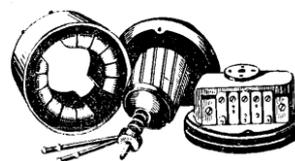
Синхрондау орамасы әрқашан үлестірілген болып жасалады және фазалы роторлы асинхронды қозғалтқыштың роторлық орамасы жұқа электр техникалық болатпен жинақталған цилиндрлік пакетке орналастырылады. Қоздыру орамасы үлестірілген және шоғырланған, яғни айқын полюсті орам түрінде болады. Үлестірілген орамның кемшілігі: индикаторлық тасымалдау кезінде жоғарғы қателікті тудыратын бастапқы бөлігінде тік болып келетін момент сипаттамасын береді. Бұл кемшіліктерді жою үшін машинаның көлденең өсі бойымен қысқа тұйықталу тізбегін құратын қосымша ораманы қолдану қажет. Бұл құрамын күрделендіреді және қымбаттатады. Қоздыру орамасымен таратылған сельсиндер трансформатор режимінде жұмыс жасайтын жүйелерде қабылдағыш ретінде жиі қолданылады.

Осылайша, бір фазалы қалыпты түрдегі сельсинді, статорында жинақталған қоздыру орамасы бар және роторында таратылған синхрондау орамасы бар, машина ретінде қабылдау қажет. Өзіндік синхрондау мүмкіндігі үшін бір рет айналу аралығындағы полюстер санын әрдайым екіге тең деп алады. Осындай сельсиннің статоры мен роторының көлденең қимасы 3.1 суретте көрсетілген. Полюстер бұрыштық қамтуы $120 - 130^\circ$ болатын полюстік ұштардан тұрады. Ауа саңылауындағы өрістің қисық пішінін синусоидаға жақындату үшін ауа саңылауының шамасын полюстің ортасынан алшақтау етіп, шамасына байланысты көбейтеді. Тістік гармоникаларды әлсірету үшін ротордың саңылаулары жонылған. Щетка мен сақина арасындағы өтпелі кедергіні азайту үшін сақинаға тақалған жерлерін күміспен дәнекерлеп, металды пластикалар түрінде жасайды. Сонымен қатар статор қабы жалпақ электр техникалық болатпен жиналады.

3.2 суретте сельсин бөлшектелінген түрінде көрсетілген. Мұнда сол жағында машинаның статоры орналасқан, ортасында сақиналы ротор, оң жағында щетка ұстағышы бар мойынтіректі қалқан.



3.1 сурет – Сельсин магнит өткізгішінің көлденең қимасы



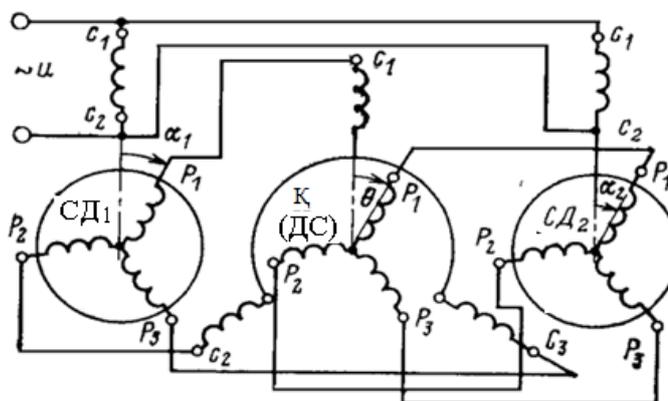
3.2 сурет – Түйіспелі сельсиннің бөлшегі

Индикаторлық сұлба немесе бақылау жетегі берілген екі бұрыштын қосындысына немесе айырмашылығына тең бұрышты пысықтауы тиіс жағдайларда элементтердің бірі ретінде дифференциалды сельсинді пайдаланатын синхронды байланыс жүйесі қолданылады.

Дифференциалды сельсиннің құрылысы өстерінің арасы 120° ығысқан роторы мен статорында үшке бөлінген орамалары бар, үш фазалы асинхронды қозғалтқыштың құрылысына ұқсас болады. Орамның басы ортақ нүктеге жалғанған, ал соңы қысқыштармен шығарылған, ротор орамалары байланыс сақинасы мен щетка арқылы жылжымайтын қысқыштармен жалғанған. Тармақ саны, орамның орналасуы, саңылау саны және орамалардың параметрлері бойынша статор мен ротор бірдей жалғанған.

Дифференциалды екі датчикпен жұмыс жасайтын сельсиндер синхронды байланыс сұлбаларында қабылдағыш ретінде немесе екінші датчик ретінде қолдануы мүмкін.

3.3 суретте қарапайым типті екі сельсин-датчигі бар индикаторлы сұлба көрсетілген: *СД1* және *СД2*. Оның синхрондау орамасы білігінде теңгерілген тілшесі бар, қабылдағыш (К) рөлін атқаратын, дифференциалды сельсиннің (ДС) статоры мен роторының орамасына жалғанған.



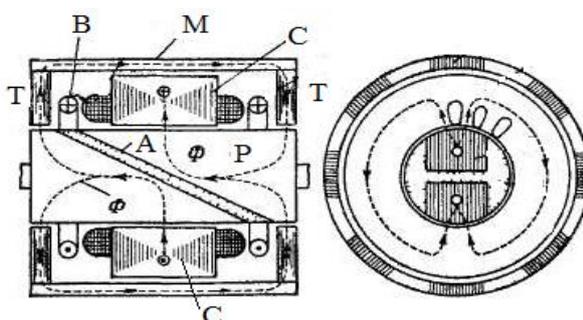
3.3 сурет – Екі датчик пен қабылдағыш ретінде жұмыс жасайтын, дифференциалды сельсиннен тұратын индикаторлы сұлба

Егер $СД1$ датчик роторы α_2 бұрышына $СД2$ датчик роторының айналу бағытына қарама-қарсы бағытта бұрылса, онда магнит ағындары $\alpha_2 + \alpha_1$ бұрышына ауысады, нәтижесінде дифференциалды сельцин роторы да сол бұрышқа бұрылады.

Осылайша, егер сельцин - дифференциалды ротор еркін айнала алатын болса, онда α_1 және α_2 бұрыштарын $Д1$ және $Д2$ датчиктеріне орнатқан кезде, бұрылу бағытына байланысты ол α бұрышын құрады:

$$\alpha = \alpha_2 \pm \alpha_1. \quad (3.1)$$

Қазіргі кезде түйіспесіз сельсиндер кең таралған. Жылжымалы контактілердің болмауы өнімділіктің жақсы тұрақтылығын алуға және дәлдік класын ұзақ уақыт сақтауға мүмкіндік береді. Қазіргі контактісіз сельсиннің құрылымы 3.4 суретте көрсетілген.



3.4 сурет – Түйіспесіз сельсин құрылысының сұлбасы

Ротор Р магниттік емес материалдан тұратын II аралықпен бөлінген қаңылтыр болаттан жасалған екі пакеттен тұрады. Ротордың жеке парақтарының жазықтықтары білік осіне параллель орналасқан. Екі пакет те пластикке нығыздалып басылған және цилиндр түрінде өңделген. Роторда орамалар жоқ. Машинаның статоры негізгі С пакетінен және екі бүйірлік сақинадан (тороидтардан) тұрады т.б. Пакет пен тороидтар да қаңылтыр болаттан жасалған, парақ жазықтықтары білік осіне перпендикуляр. Негізгі пакеттің ішкі бетінде үш фазалы типте орындалған үлестірілген синхрондау орамасы салынған ойықтар мөрленген. Тороидтарда орамалар жоқ. Тороидтарға қаңылтыр болаттан (білік осіне параллель) жиналған және алюминий қорытпасынан жасалған сыртқы цилиндрлік корпусқа құйылған сыртқы магниттік М пакеттері бекітілген. Тороидтар мен негізгі статор пакеті арасында роторды қоршап тұрған оқшауланған сыммен оралған сақиналы орамдар тәрізді қоздыру орамдары орналасқан. Байланыс сельсиндері сияқты, қоздыру орамдары (тізбектей қосылған) бір фазалы желіге, ал синхрондау орамасы байланыс желісіне қосылған.

Жұмыс принципін анықтау үшін байланыссыз сельсиннің қоздыру орамасымен пайда болатын, магнит ағынының жолын бақылаймыз. Қазіргі уақыттағы қоздыру орамасындағы токтың бағыты 3.4 суретте көрсетілгендей болсын. Онда ағын оңнан солға қарай бағытталады. Ротордың оң жағында ағын осьтік бағытта жүреді, бірақ II аралық түрінде айтарлықтай магниттік кедергіге

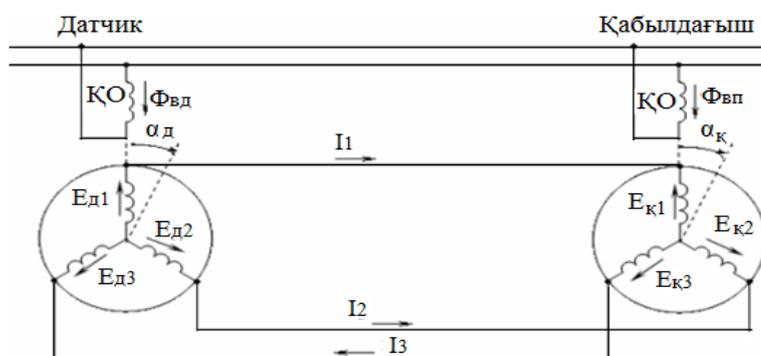
тап болып, ол жоғары қарай бұрылуға, ротор мен негізгі C статор пакеті арасындағы ауа саңылауынан өтуге мәжбүр болады, және сызба жазықтығының артына бұрылады (крестикпен көрсетілген). Әрі қарай, статор арқалығының маңайын бойлай отырып, ағын статор қабының астыңғы бөлігіне түседі (шеңбердегі нүкте) және ауа саңылауы арқылы роторға қайта шығады, бірақ оқшаулайтын аралықтың сол жағынан шығады. Содан ротордың сол жағынан өте отырып, ағын екіге бөлінеді және трюид магнит өткізгіштің (M) сыртқы жағынан ротордың бірінші бөлігіне қайта келеді. Осылайша, негізгі қаптан C өте отырып, ағын синхрондау орамасына ілігеді. Егер роторды бұрсак, онымен бірге ағын да бұрылады, ал синхрондау орамасы жылжымайтын болғандықтан, ағынның ілесуі байланысқан сельсиндегідей заңмен өзгереді. Сондықтан байланысқан сельсиннің жұмысының талдауы синхронды байланыс жүйесіндегі байланыссыз сельсиннің теориялық жұмыс талдауынан ешқандай айырмашылығы жоқ.

3.2 Сельсиндердің индикаторлық жұмыс режимдері

Автоматтандыру жүйесінде бұрыштың берілуі екі, принципіалды әртүрлі сұлбалар арқылы жүзеге асырылады: индикаторлық және трансформаторлық.

Индикаторлық сұлба статикалық кедергі моменті аз қабылдау өсінде қолданылады (тілше, аспап шкаласы және т.б.). Бұл сұлбаларда сельсин-қабылдағыш датчик тағайындаған бұрышты өз бетінше өтейді.

Индикаторлық байланыстың сұлбасы 3.5 суретте келтірілген.



3.5 сурет – Индикаторлық сұлба «берілу бұрышы»

Датчиктің және қабылдағыштың қоздыру орамын айнымалы токпен қоректендіргенде синхрондау орамында сәйкесінше E_K сельсин қабылдағышында және E_D сельсин датчигінде ЭҚК индукциялайтын $\Phi_{вд}$ және $\Phi_{вп}$ лүпілді қоздыру ағыны пайда болады. Әрбір ЭҚК шамасы орамның қоздыру өсіне қатысты бұрыштың орналасуына тәуелді болады. Егер магнит өрісінің индукциясының гармоникалық заңын қабылдасақ, онда:

$$E_{д1} = E_m \cdot \cos \alpha_{д}; \quad E_{к1} = E_m \cdot \cos \alpha_{к};$$

$$E_{д2} = E_m \cdot \cos(\alpha_{д} - 120^0); E_{к2} = E_m \cdot \cos(\alpha_{к} - 120^0); \quad (3.2)$$

$$E_{д3} = E_m \cdot \cos(\alpha_{д} - 240^0);$$

$$E_{к3} = E_m \cdot \cos(\alpha_{к} - 240^0).$$

мұндағы E_m – ЭҚК максималды мәні.

Егер сельсиндер келісілген күйде болса, датчик пен қабылдағыштың аттас фазаларының ЭҚК-рі шамасы бойынша тең және бір-бірін теңестіреді, сондықтан синхрондау орамдары бойынша ток өтпейді. Датчикті $\alpha_{д}$ бұрышына бұрған кезде ЭҚК теңдігі бұзылады. Синхрондау орамдары мен байланыс желілері арқылы токтар жүреді, олар қоздыру ағындарымен әрекеттесіп, датчик пен қабылдағыштың білігіне бірдей әсер ететін моменттерді құрады. Датчик әдетте бекітілгендіктен, қабылдағыш сол жаққа және сол бұрышқа бұрылады, өйткені тек келісілген жағдайдағы ЭҚК бір-бірін қайтадан теңестіреді.

Датчик пен қабылдағыштың бір аттас фазалары қарама-қарсы жалғанғандықтан, олар арқылы өтетін ток:

$$I_1 = \frac{E_{д1} - E_{к1}}{2 \cdot Z_{\phi}}; I_2 = \frac{E_{д2} - E_{к2}}{2 \cdot Z_{\phi}}; I_3 = \frac{E_{д3} - E_{к3}}{2 \cdot Z_{\phi}}, \quad (3.3)$$

мұндағы Z_{ϕ} - сельсиндердің біреуінің синхрондау орамасының толық кедергісі және байланыс желісінің жартылай кедергісі.

Токтар синхрондау орамы арқылы өту кезінде жеке әрбір фазалардың магниттелу күшін (МК) тудырады және бұл күштер жинала келе датчик пен қабылдағыштың нәтижелік магниттелу күшін тудырады. Жинақтық МК $F_{дп}$ бойлық құраушыдан тұрады, ол қоздырушы ағынға қарсы бағытталған және $\Phi_{вп}$ қоздырушы орам ағынымен әрекеттесе отырып P_{qn} көлденең сельсин құраушысын магнитсіздендіруге тырысады, ол арқылы айналатын синхрондау моментін тудырады:

$$M_{ст} = M_m \cdot \sin \theta, \quad (3.4)$$

мұндағы M_m - максималды синхрондау моменті;

θ - $\alpha_{д}$ және $\alpha_{к}$ бұрылу бұрыштары арасындағы келісілмеу бұрышы.

(3.3) формуласы синхрондау моментінің келісілмеу бұрышына гармоникалық тәуелділігін көрсетеді, сельсиндер екі тұрақты жағдайда бола алады: $\theta = 0^0$ және $\theta = 180^0$ кезіндегі жағдайлар. Бірақ $\theta = 180^0$ кезіндегі жағдайы - тұрақты емес теңдік жағдайы. Сельсин $\theta = 180^0$ қалпынан $\theta = 0^0$ қалыпқа ауысуына аз ауытқыту жеткілікті.

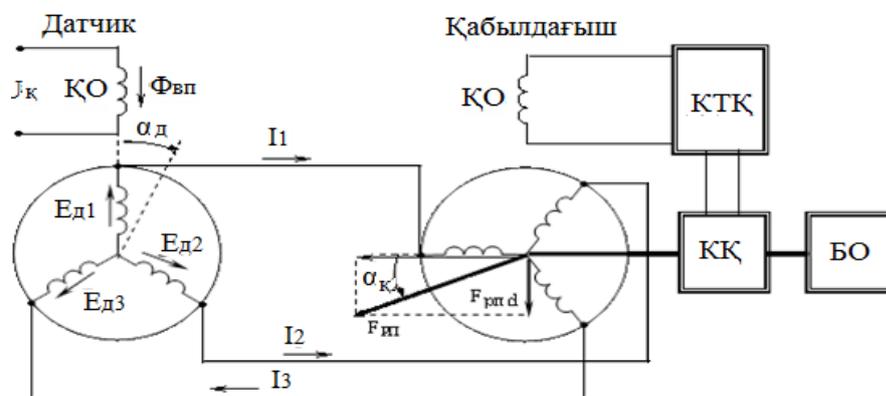
3.3 Сельсиндердің трансформаторлық жұмыс режимі

Трансформаторлық сұлба қабылдау өсі бойында айтарлықтай кедергі моменті болған кездерде қолданылады. Осы сияқты сұлбаларда сельсин қабылдағыш тек қандай да бір механизмнің бұрылуын қамтамасыз ететін қуаты үлкен қозғалтқышты басқарады.

Сельсиндердің трансформаторлық режимде жұмыс жасауының қарапайым сұлбасы 3.6 суретте көрсетілген. Сельсин-датчиктің бір фазалық қоздыру орамасы синхрондау орамасында ЭҚК-ін индукциялайтын $\Phi_{вд}$ пульсациялық магнит ағынын тудырады:

$$E_{д1} = E_m \cos \alpha_d; \quad E_{д2} = E_m \cos(\alpha_d - 120^\circ); \quad E_{д3} = E_m \cos(\alpha_d - 240^\circ). \quad (3.5)$$

ЭҚК әсерінен синхрондаушы фазалық орамдардан және байланыс сымдарынан $I_\phi = E_\phi / 2Z_\phi$ формуласы арқылы анықталатын токтар өтеді. Мұндағы « ϕ » индексі фаза тогы, ЭҚК және ротор фазасының толық кедергісі қосылған байланыс сымының жартылай кедергісі дегенді білдіреді. Токтар қабылдағыштың фазалары арқылы өтуі кезінде $F_{рпд}$ қабылдағыштың нәтижелік магниттік күшін (МК) тудырады. Оның кеңістіктегі жағдайы өзінің қоздырушы орамына сәйкес датчик пен қабылдағыштың синхрондау орамының орналасуына тәуелді болады. Негізгі жағдай ретінде осы МК қабылдағыштың қоздыру орамына перпендикуляр болатындай жағдай алынады.



КТҚ - күштік-түрлендіргіш құрылғысы; КҚ - күштік қозғалтқыш; БО - басқару объектісі.

3.6 сурет – Трансформаторлық сұлба «берілу бұрышы»

Датчик қандай да бір α_d бұрышқа бұрылуы кезінде дәл сондай бұрышқа, бірақ қарама-қарсы жаққа қарай қабылдағыштың нәтижелік МК-де бұрылады. Осы МК бойлық құраушысы $F_{рпд}$ қабылдағыштың қоздыру орамында ЭҚК тудырады, ол күштік түрлендіргіш құрылғы (КТҚ) арқылы күштік қозғалтқышқа (КҚ) әсер етеді. Осының салдарынан күштік қозғалтқыш айналып басқару объектісін (БО), сонымен бірге сельсин-қабылдағыштың роторын нәтижелік МК $F_{рп}$ бастапқы бұрышқа келгенше, яғни қайтадан қабылдағыштың қоздыру орамының өсіне перпендикуляр болғанша бұра бастайды, осы жағдайда ғана ЭҚК болмайды және қозғалтқыш айналуын тоқтатады.

Осылайша сельсин-қабылдағыштың синхрондаушы орамының нәтижелік МК келісілмеу бұрышына тәуелді емес және МК бір фазасының амплитудасынан 1,5 есе артық болады.

F_d магниттеуші күші Φ_d магнит ағынын тудырады, ол датчиктің қоздырушы орамасында ЭҚК тудырады:

$$E_{\text{шығ}} = 4,44fw_B \Phi_d = 4,44fw_B \Phi_d \sin\theta = E_m \sin\theta. \quad (3.6)$$

Сонымен шығыстағы ЭҚК датчик пен қозғалтқыштың келісілмеу бұрышының гармоникалық функциясы болып табылады.

Трансформаторлық сельсин-қабылдағыштардың дәлдігі индикаторлық сельсин-датчиктердің дәлдігіне ұқсас анықталады, яғни асимметрия қателігі анықталады, ол арқылы трансформаторлық сельсин-қабылдағыштар жеті түрлі класқа жіктеледі. Трансформаторлық сұлбаның жұмыс жасау сапасы: салыстырмалы шығыс кернеуге - U_c , қалдық шығыс кернеуге - U_k , салыстырмалы шығыс қуатқа - P_c байланысты.

Салыстырмалы шығыс кернеуі - $\theta = 1^\circ$ бұрыштағы кернеу, ол барлық жүйенің сезімталдығын анықтайды.

Қалдық шығыс кернеуі - сәйкессіздік бұрышы жоқ кездегі қоздырушы орамдағы кернеу. Әдетте U_k 0,2 - 0,5 В аралығында болады.

Салыстырмалы шығыс қуаты - $\theta = 1$ кезіндегі қуат. Осы көрсеткіш артқан сайын, соғұрлым күшейткіш ерте жұмыс жасап бастайды, соғұрлым жүйенің сезімталдығы жоғары болады.

Бақылау сұрақтары

1.1 Екі датчик пен қабылдағыш ретінде жұмыс жасайтын, дифференциалды сельсиннен тұратын индикаторлы сұлбасы.

1.2 Сельсиндердің индикаторлық жұмыс режимдері.

1.3 Сельсиндердің трансформаторлық жұмыс режимі.

4 Айналмалы трансформаторлар, олардың тағайындалуы және жұмыс істеу принципі

4.1 Айналмалы трансформатордың құрылысы

Бұрылмалы немесе айналмалы трансформатор – амплитудасы белгілі бір функционалды тәуелсіз бұрышпен байланысты ротордың айналу бұрышының кернеуге айналуына арналған айнымалы токтың индукциялық электр машинасы.

Айналмалы трансформаторлар ротордың α айналу бұрышының (мысалы $\sin \alpha$ немесе $\cos \alpha$, α бұрышын) кейбір функцияларына пропорционалды шығыста кернеуді алу үшін автоматтық құрылғыларда қолданылады. Кейбір жағдайларда айнымалы трансформаторлар тригонометриялық тапсырмаларды шешуге арналған құрылғы ретінде қолданылады (тік бұрышты үш бұрыштың екі катеті арқылы гипотенузаны табу).

Айналмалы трансформаторлар құрылысы бойынша фаза роторлы асинхронды қозғалтқышқа ұқсас болады. Статор мен ротор электр техникалық болаттан және орама орналасқан саңылаудан тұрады. Статор ротордың

арасындағы бос саңылау тұрақты шамаға ие. Статордың орамасының ұшы қозғалмайтын қысқыштарға қосылған, ал ротор орамасының ұшы жанасқан сақиналармен байланысқан. Оларға жанасқан металл щеткасы қозғалмайтын қысқыштармен байланысқан. Кейбір жағдайларда ротордың бұрылу бұрышының шектелгенін ескере отырып, ротордың орамасының ұшын қысқыштармен иілгіш өткізгіштің көмегімен жалғайды.

Әдеттегідей, ротор мен статорда 90 эл. град бұрышқа өзара ығысқан екі орама орналасқан. Орамалардың кеңістікте орналасуы 4.1 суретте көрсетілген. Мұндағы $S_1 - S_2$ – басты статор орамасы;

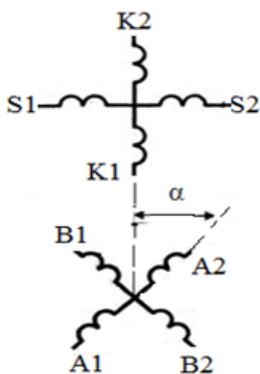
$K_1 - K_2$ – статордың жанама орамасы;

$A_1 - A_2$ және $B_1 - B_2$ – ротордың синус және косинус орамасы.

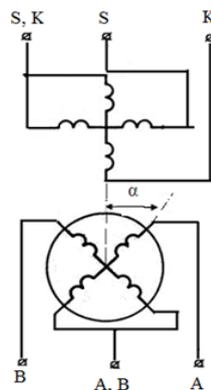
Әдетте, статордың екі орамасы (S және K) бірдей тармақ санымен, бірдей сымның қимасымен және секцияның бірдей жалғану сұлбасымен орындалады. Дәл осылай екі ротордың орамасы да бірдей орындалады.

Ротор статорға қатысты дәлдік редукторлы механизмі арқылы туынды α бұрышына айналады. α бұрышын K статор орамнан (немесе S статор орамының осімен перпендикуляр) A ротор орамының синусты осіне дейін есептейміз.

4.2 суретте көрсетілгендей, қысқыштардың шықпа санын 8-ден 6-ға дейін төмендету үшін машинаның ішіндегі статор орамаларын және ротор орамаларын бір жақты жалғануын қолданады.



4.1 сурет - Айнымалы трансформатордың орамдары

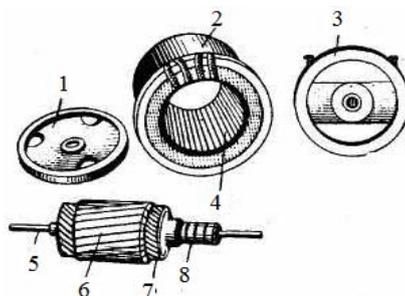


4.2 сурет - Айнымалы трансформатордың орамдарын жалғау сұлбасы

4.3 суретте айнымалы трансформатордың бөлшектелінген түрі көрсетілген.

Айнымалы трансформатордың атқаратын міндеті қандай болса да, оның құрылымы соңғы бұрылу кезінде статор мен ротор орамдары арасындағы өзара индукциялық өзгерістерді қамтамасыз етуі қажет, заң бойынша кемшіліксіз синусоидаға өте жақын болуы мүмкін. Көптеген жағдайда жіберілетін қателіктер $0,05\%$ артық болмауы қажет, яғни ротордың айналу бұрышынан бастап кез келген нүктеге дейін өзара индукцияның нақты қисық ординаттарының өзгерісі соңғы амплитудадан, идеалды синусоида

ординаттарынан 0,0005 артық айырмашылықта болуы қажет. Мұндай жоғарғы талаптар тек қана орам түрін, статор мен ротор саңылау сандарын, ауа саңылауының шамасын, магнит өзекшесі материалының қанығу дәрежесін таңдауда, сонымен қатар пакеттерді қатесіз жинауды, мөрлеудің дәлдігін қамтамасыз ететін мұқиятты түрде дайындайтын технологияларда, және т.б. жағдайларда сақталады.



1 және 3 - подшипникті мойынтіректер; 2 - сыртқы бөлігі; 4 - статордың өзекшесі; 5 - білік; 6 - ротордың өзекшесі; 7 - ротор орамы; 8 - түйіспелі сақина.

4.3 сурет – Айнымалы трансформатордың түйіндері және бөлшектері

Өрескел және дәлдік шкалалармен саналатын редуктор, ротордың айналу бұрышын жоғарғы дәлдікпен өлшеуді қамтамасыз етуі қажет. Мұндай редукторлы механизмді машинаның сыртқы бөлігіне орнатады немесе айналмалы трансформатор білігін берік бекітетін дербес түйін ретінде дайындалады.

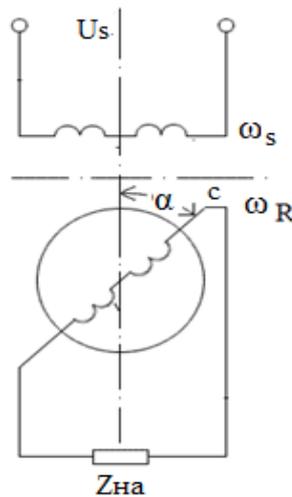
4.2 Синусты айналмалы трансформатор

Негізгі S статор орамы, шамасы тұрақты U_S тиімді кернеумен айнымалы ток көзіне жалғанған деп қарастырайық. A ротор орамы сыртқы жүктемені қоректендіреді, ол Z_{HA} кедергісімен сипатталған. Екінші K статор орамы және екінші B ротор орамы ажыратылған. Мұндай айнымалы трансформатордың сұлбасы 4.4 суретте көрсетілген, онда K және B орамдары жоқ, сондықтан бұл орамдардың жұмысқа қатысы жоқ деп есептесек болады.

Орам түрлерін таңдау, машинаны есептеу, оның құрылымы мен технологиялық орындалуы S пен A орамдардың арасындағы өзара индуктивтіліктің α ротор бұрылу бұрышынан дәл синусоидалық тәуелділігін құрды деп қарастырайық. Онда:

$$M_{SA} = (M_{SA})_{\max} \sin \alpha, \quad (4.1)$$

мұндағы $(M_{SA})_{\max}$ өзара индуктивтіліктің максимал мәні $\alpha = 90^\circ$ бұрышына, яғни, S және A орамдарының өстерінің түйіндісіне сәйкес келеді.



4.4 сурет - Синусты айнымалы трансформатордың сұлбасы

Өзара индуктивтілік электр магнитті байланысқан орамдардың орама санының туындысына пропорционалды болғандықтан 4.1 теңдеуді төмендегі теңдеумен алмастыруға болады:

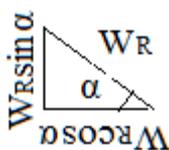
$$M_{SA} = a w_S w_R \sin \alpha, \quad (4.2)$$

мұндағы a – пропорционалдық коэффициент;

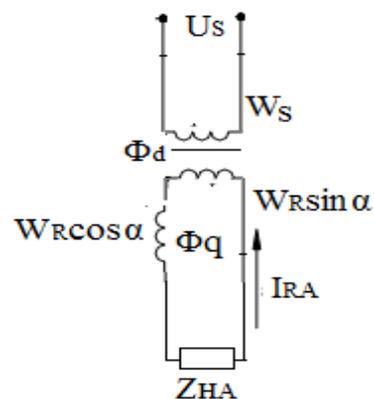
w_S - S ораманың орам саны;

w_R - A ораманың орам саны.

Сонымен ротор α бұрышына бұрылған кездегі S және A орамдар арасындағы өзара индуктивтілік, осы орамдардың өстері тең болып, бірақ A орамның орама саны w_R белгісіз мәніне емес, ал $w_R \sin \alpha$ мәніне тең болған кездегі өзара индуктивтілікпен бірдей болады. Осыдан A ораманың толық орам санын өсі S орамасының өсімен сәйкес келетін $w_R \sin \alpha$ «бойлық орамдармен», өсі S орамасының өсіне перпендикуляр келетін $w_R \cos \alpha$ «көлденең орамдардың» геометриялық қосындысы ретінде қарастыруға болады (4.5 сурет). Олай болса, 4.4 суретте көрсетілген сұлбаны 4.5 суреттегі сұлбаға алмастыруға болады.



4.5 сурет – Ротор орамасының көлденең және бойлық орамдарына жіктелуі



4.6 сурет – Синусты айналмалы трансформатордың түрлендірілген сұлбасы

Алдымен айналмалы трансформатордың, A ротор орамасы ажыратылған, яғни $Z_{HA} = \infty$, бос жүріс режимін қарастырайық. Бұл жағдайда A орамасы арқылы ток өтпейтіндіктен, ротордың E_{RA} ЭҚК тек S орамасы мен $w_R \sin \alpha$ бойлық орамдарының арасындағы өзара индуктивтіліктің ағынымен, яғни тек Φ_d бойлық ағынымен анықталады. Онда:

$$\dot{E}_{RA} = (\dot{E}_{RA})_{\max} \sin \alpha, \quad (4.3)$$

мұндағы

$$(\dot{E}_{RA})_{\max} = \dot{E}_S \frac{w_R}{w_S} = k \dot{E}_S. \quad (4.4)$$

$\alpha = 90^\circ$ бұрылыс бұрышына сәйкес келетін және E_S статор орамасының тасымалдау коэффициентіне көбейтілген ЭҚК мәніне тең, ЭҚК максималды мәнін білдіреді. Тасымалдау коэффициент:

$$k = \frac{w_R}{w_S}. \quad (4.5)$$

Сәйкесінше,

$$\dot{E}_{RA} = k \dot{E}_S \sin \alpha. \quad (4.6)$$

Сонымен, талқыланған сұлба бойынша жұмыс жасайтын машина бос жүріс кезінде ротордың ЭҚК α бұрылыс бұрышының синусоидалы функциясы болатын, синустық айналмалы трансформатор болып табылады.

Ротор орамасын $Z_{жА}$ кедергісіне жүктеген кезде, оның бойынан I_{RA} тогы өтеді. Ротордың $w_R \sin \alpha$ бойлық орамдарымен және S статор орамасының магниттеу күшімен пайда болған Φ_d бойлық ағыны, осы орамаларда өзара индукциялық ЭҚК индукциалайды.

$$\dot{E}_{RM} = k \dot{E}_S \sin \alpha. \quad (4.7)$$

I_{RA} тогы $w_R \cos \alpha$ көлденең орамалары арқылы өтіп, S статор орамасымен тізбектелмеген, осы орамдарда өзіндік индукциалы ЭҚК индукциалайтын Φ_d көлденең ағынын тудырады:

$$\dot{E}_{RL} = -j\omega L \dot{I}_{RA}. \quad (4.8)$$

Өзіндік индуктивтілік:

$$L = (w_R \cos \alpha)^2 \Lambda, \quad (4.9)$$

мұндағы Λ – ауа саңылауының біркелкілігі ротордың айналу бұрышына тәуелді болмайтын магниттік өткізгіштік. A орамында индукциаланатын толық ЭҚК \dot{E}_{RM} және \dot{E}_{RL} ЭҚК қосындысы болып табылады:

$$\dot{E}_{RA} = \dot{E}_{RM} + \dot{E}_{RL} = k \dot{E}_S \sin \alpha - j\omega \dot{I}_{RA} (w_R \cos \alpha)^2 \Lambda. \quad (4.10)$$

Ротордың тогы:

$$\dot{I}_{RA} = \frac{\dot{E}_{RA}}{Z_{HA} + Z_{RA}}, \quad (4.11)$$

мұндағы Z_{RA} – A орамының толық кедергісі. Онда:

$$\dot{E}_{RA} = k \dot{E}_S \sin \alpha - j \omega \frac{\dot{E}_{RA}}{Z_{HA} + Z_{RA}} w_R^2 \cos^2 \alpha \Lambda = k \dot{E}_S \sin \alpha - b \dot{E}_{RA} \cos^2 \alpha, \quad (4.12)$$

мұндағы тұрақты комплексті көбейткіш:

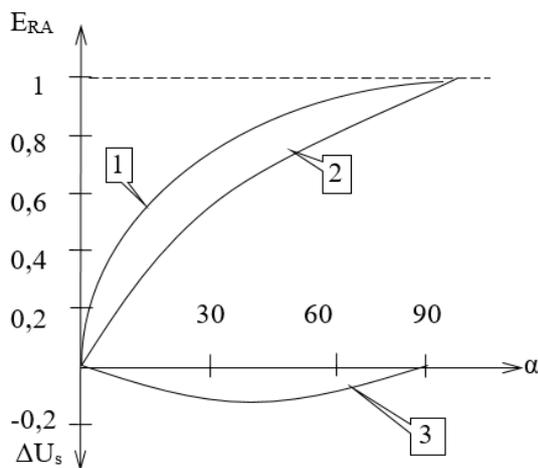
$$b = j \frac{\omega w_R^2 \Lambda}{Z_{HA} + Z_{RA}}. \quad (4.13)$$

4.12 теңдеуі арқылы төмендегі теңдікті аламыз:

$$\dot{E}_{RA} = \frac{k E_S \sin \alpha}{1 + b \cos^2 \alpha}. \quad (4.14)$$

Осы теңдеудегі бөлімінің екінші мүшесінде $\cos^2 \alpha$ бар болғандықтан, синусты айналмалы трансформаторды жүктеген кезде E_{RA} ЭҚК α бұрышына тәуелді сипаттамасында синусоидалы бұрмалау өзгерісі пайда болады. Бұл бұрмалау өзгерісі физикалық мағынада жүктелгеннен кейін Φ_q көлденең ағынның, яғни ротордың көлденең реакциясының пайда болуымен түсіндіріледі.

Осы жағдайда алынған сипаттама 4.7 суретте көрсетілген. Мұндағы 1 қисық сызық бос жүріс ЭҚК синусоидасын білдіреді (егер ротор көденең орамдарының магнитсізденуінің әсерінен, жүктелген кездегі көлденең ағынның өзгерісін елемеген жағдайда), ал 2 қисық сызық (4.14) теңдеуі бойынша тура масштабпен салынған, ротордың көлденең өрістің әсерінсіз нақты ЭҚК білдіреді. 3 қисық 1 және 2 қисықтардың айырымына сәйкес келеді, яғни қателік қисығы болып табылады. 4.14 теңдеудегі b шамасы, 2 қисықты есептегенде бірге тең деп алынғандықтан, сипаттамадағы бұрмалау өзгерісі нақты $b < 1$ кездегіге қарағанда шындыққа жанаспайтындығын байқаймыз.



4.7 сурет – Синусты айналмалы трансформатор қателігінің ротордың бұрылу бұрышына тәуелділігі

Егер A ротор орамасы ажыратылып, B орамасын ғана жүктесек, онда S статор орамасы мен B ротор орамасы арасындағы өзара индуктивтілік:

$$M_{SB} = (M_{SB})_{\max} \cos \alpha. \quad (4.15)$$

Онда бос жүріс кезінде:

$$\dot{E}_{RB} = (\dot{E}_{RB})_{\max} \cos \alpha, \quad (4.16)$$

яғни, машина косинусты айналмалы трансформаторға ауысады. Жоғарыда айтылған жағдайларды ескере отырып, B орамасын сыртқы $Z_{жс}$ кедергіге жүктегендегі ЭҚК:

$$\dot{E}_{RB} = \frac{kE_S \sin \alpha}{1 + b \cos^2 \alpha}. \quad (4.17)$$

Мұнда косинусоидалы тәуелділіктің бұрмалануы құрамында $\sin^2 \alpha$ бар бөлгіштің мүшесімен белгіленген.

Айнымалы трансформаторларда шығыс кернеуі бұрылу бұрышының синус немесе косинус заңдарына қатаң сай келуі керек болғандықтан, тәжірибе жүзінде симметриялауға сүйену керек. Яғни, компенсация арқылы ротор реакциясынан қателікті жою керек. Ол екі ротор орамасын (екінші реттік симметриялау) немесе екінші статор орамасын (бірінші реттік симметриялау) тең жүктеу арқылы жүзеге асады.

4.3 Айналмалы құрушы трансформатор

4.8 суретте көрсетілген құрушы-трансформатордың сұлбасы тік бұрышты үш бұрыштың 2 берілген катеті бойынша гипотенузасын (шамасы мен бұрышы бойынша) анықтауға қолданылады. Мұнда S және K статор орамалары потенциометр арқылы, ораманың кірісінде қажетті U_S және U_K кернеу шамаларын келтіруге рұқсат беретін бірден бір фазалы жүйеге жалғанады. Ротор орамы тікелей сызықтық өлшемдермен шектелетін аспапқа қосылған. Екінші B ротор орамы AQ атқарушы қозғалтқышың басқару орамын қоректендіреді. Осы қозғалтқыштың қоздыру орамасы айналмалы трансформатордың статор орамалары жалғанған желіге жалғанады. Атқарушы қозғалтқыш пен айналмалы трансформатордың роторлары механикалық түрде бәсеңдеткіш арқылы жалғанған.

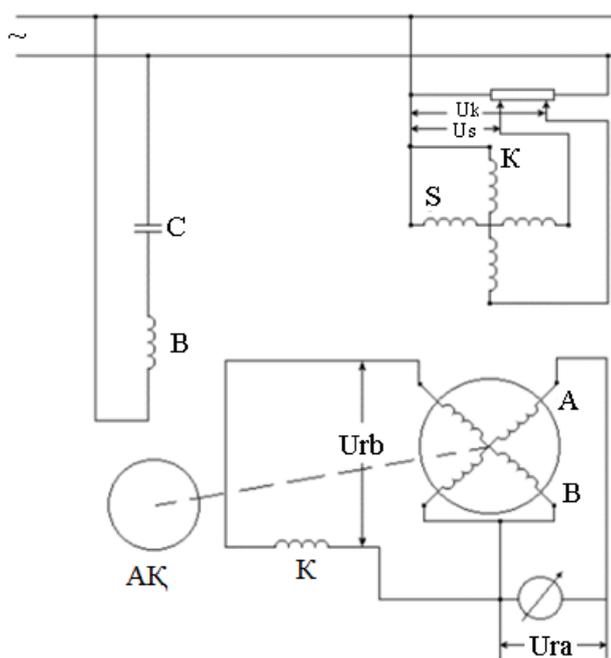
Сұлбаның жұмысы келесідегідей болады. Тік бұрышты үш бұрыштың s және k катеттері берілген (4.9, a сурет) және оның a гипотенузасын анықтау керек делік. Егер айналмалы трансформатордың S және K орамдарына потенциометрлерден алынған кернеу мәндерін келтірсе:

$$U_S \equiv S, \quad (4.18)$$

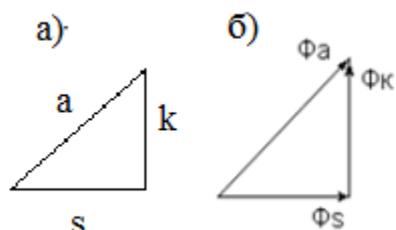
$$U_K \equiv k,$$

онда осы орамдардың I_{sw_S} және I_{kw_K} магниттелуші күштері кеңістікте қозғалмайтын, S және K орамалардың өстерінде пульсациялық, магнит өткізгіштігінің қанығуы болмаған жағдайда оларды тудырған U_S және U_K

кернеулерге пропорционалды болатын Φ_S және Φ_K (4.9, б сурет) ағындарын тудырады. Осы ағындарды геометриялық қосқанда нәтижесінде Φ_A қорытынды ағын пайда болады. Ол кеңістікте S және K орамдарымен салыстырғанда, берілген тік бұрышты үш бұрыштың a гипотенузасының s және k катеттеріне қатысты бір бұрышта орналасқан. Сонымен қатар Φ_S , Φ_K және Φ_A ағындардың өлшемдері – үш бұрыштың s , k және a қабырғаларына пропорционалды екені белгілі. Φ_A магнит ағыны ротор орамалары арқылы өтіп, онда E_{RA} және E_{RB} ЭҚК тудырады. В орамының E_{RB} ЭҚК басқару орамының қысқышында U_{RB} кернеуін тудырады. Осы кернеудің әсерінен атқарушы қозғалтқыштың роторы айналып, айналмалы трансформатордың роторын айналдыра бастайды.



4.8 сурет – Айналмалы құрушы-трансформатордың сұлбасы



4.9 сурет – Үш бұрыш гипотенузасын анықтау

A орамының ЭҚК құрылғының қысқыштарында U_{RA} кернеуін тудырады. Роторды айналдырғанда U_{RA} және U_{RB} кернеулерінің шамасы, ротормен бірге айналатын A және B орамдар өстерінің орналасуына байланысты өзгереді. B орамының өсі Φ_A магнит ағынының өсіне перпендикуляр болғанда, осы орамның ЭҚК нөлге тең болады және атқарушы қозғалтқыштың роторы тоқтайды. Осы кезде A орамының өсі Φ_A магнит ағынының өсімен сәйкес келеді және құрылғы U_{RA} кернеуінің максимал мәнін көрсетеді. Ол мән берілген тік бұрышты үш бұрыштың a гипотенузасына пропорционалды болды.

Бақылау сұрақтары

- 1.1 Ротор орамасының көлденең және бойлық орамдарына жіктелуі.
- 1.2 Айнымалы трансформатордың түйіндері және бөлшектері.

1.3 Айнымалы трансформатордың орамдарын жалғау анықтамасы мен сұлбасы.

1.4 Үш бұрыш гипотенузасын анықтау.

1.5 Айнымалы трансформаторлардың құрылымы.

5 Синхронды микроқозғалтқыштар

5.1 Тұрақты магниттермен қоздырылатын синхронды микроқозғалтқыштар

Синхронды микроқозғалтқыштардың (СМҚ) басты артықшылығы олардың кернеу мен жүктеменің ауытқуына қарамастан тұрақты айналу жиілігімен айналу қабілеті болып табылады:

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}. \quad (5.1)$$

10 Вт және одан жоғары қуаттылықта синхронды микроқозғалтқыштар классикалық құрылымнан тұрады, яғни олар ауа саңылауымен бөлінген статор мен ротордан тұрады. Ротордың құрылысы мен қоздыру әдісіне байланысты СМҚ келесі түрге бөлінеді:

- 1) Электр магниттік қоздырылатын;
- 2) Тұрақты магниттермен қоздырылатын;
- 3) Реактивті СМҚ;
- 4) Гистерезисті СМҚ.

СМҚ-дың ерекше тобын төменгі жылдамдықты (редукторлы) қозғалтқыштар құрайды (асинхронды, айналмалы роторы бар, толқындық роторы бар қозғалтқыштар).

Электр магниттік қоздырылатын СМҚ құрылымының салыстырмалы күрделілігіне және автоматика жүйелерінің іске қосылуына байланысты салыстырмалы түрде сирек қолданылады. Автоматика жүйелерінде көмекші электр қозғалтқыштары ретінде тұрақты магниттерден қоздырылатын СМҚ өте кең қолданылады.

Тұрақты магниттермен қоздырылатын СМҚ құрылымының орындалуы бойынша, іске қосу әдісімен және қоректену әдісімен ерекшеленеді.

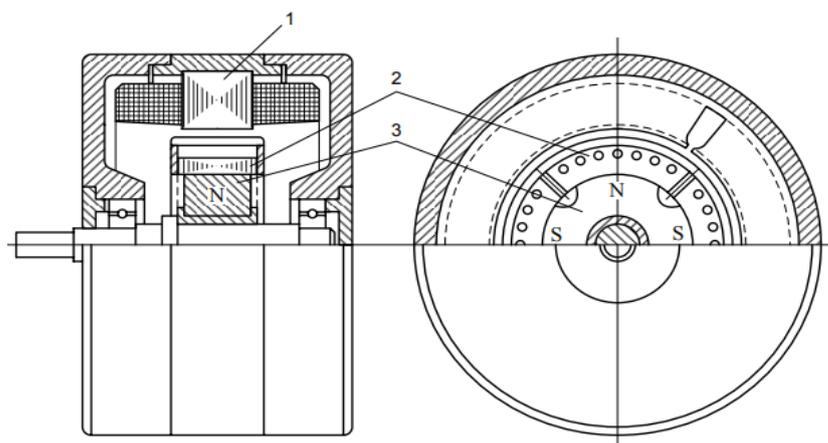
Іске қосу әдісі бойынша бұл қозғалтқыштар келесі түрге бөлінеді [6]:

- 1) Өздігінен іске қосылатын;
- 2) Асинхронды іске қосулатын;
- 3) Гистерезистік старторлы.

Асинхронды іске қосылатын СМҚ кеңінен қолданылды. Мұндай қозғалтқыштардың айрықша ерекшелігі роторда екі бөліктің болуы: тұрақты магнит және қысқа тұйықталған орам. Осы бөліктердің өзара орналасуына байланысты СМҚ екі түрі ажыратылады:

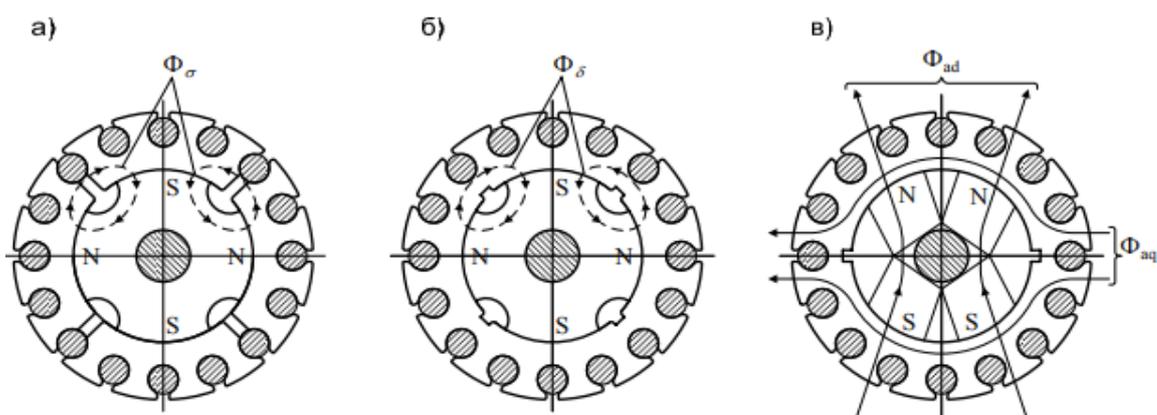
1) Магниттің радиалды орналасуы және қысқа тұйықталған орамасы бар (5.1, 5.2 сурет);

2) Аталған бөліктердің аксималды (осьтік) орналасуымен (5.3 сурет).

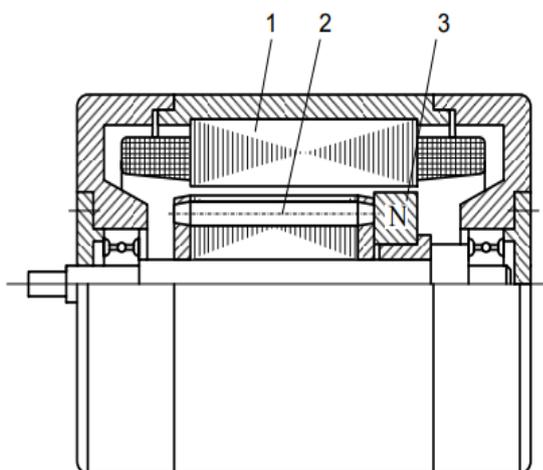


1 - статор; 2 - қысқа тұйықталған ротордың бөлігі; 3 - тұрақты магнит.

5.1 сурет - Синхронды қозғалтқыштың радиалды құрылымы



5.2 сурет - Синхронды қозғалтқыштың радиалды құрылымының түрлері



1 - статор; 2 - қысқа тұйықталған ротор; 3 - тұрақты магнит.

5.3 сурет - Қысқа тұйықталған орамалы синхронды қозғалтқыштың тұрақты магниттінің осьтік орналасуы және іске қосылуы (осьтік құрылым)

Радиалды құрылымда қысқа тұйықталған ротор болатының пакеті қалың қабырғалы цилиндр түрінде электр техникалық жұқа болат парақтарымен жиналады және жұлдызша түрінде жасалған тұрақты магнитке нығыздалып бекітіледі. Болат пакетте полюстер арасында саңылаулар бар, олардың ені СМҚ-тың құрылысына байланысты. Тұрақты магнитке нығыздалып бекітілген болат пакеттің болуы үлкен іске қосу токтары пайда болған кезде якорь әсері арқылы магниттелуіне жол бермейді.

Зәкір әсерінің ағыны тұрақты магнитті айналып өтіп, болат пакетке тұйықталады, өйткені болаттың магниттік кедергісі магниттің кедергісінен төмен. Демек, тұрақты магниттің магниттелуіне жол бермеу үшін полюстер арасындағы саңылауларды азайту керек. Алайда, магниттің шашырауын азайту және жұмыс ағынының шамасын номиналды режимде сақтау үшін бұл саңылаулар мүмкіндігінше кеңірек болуы керек. СМҚ-ын жобалау кезінде осы екі факторды да ескеру қажет.

Дегенмен, бұл жағдайда синхронды қозғалтқыштардың жалпы қолданыстағы қозғалтқыштардан айырмашылығы x_q көлденең осьтер бойынша синхронды индуктивті кедергі x_d бойлық осьтер бойынша синхронды индуктивті кедергіден үлкен ($x_q > x_d$).

Бұл көлденең ағынның бойлық ағыннан үлкен болуына байланысты. Сондықтан θ жүктеменің кіші бұрыштарында қарастырылып отырған СМҚ-тың реактивті моменті теріс болады.

Егер диаметрі бойынша шектеулер болса, онда СМҚ-тың осьтік құрылымы қолданылады. Бұл жағдайда қысқа тұйықталған болат пакеті тұрақты магнит сияқты білікке тығыздалып басылады (5.3 сурет).

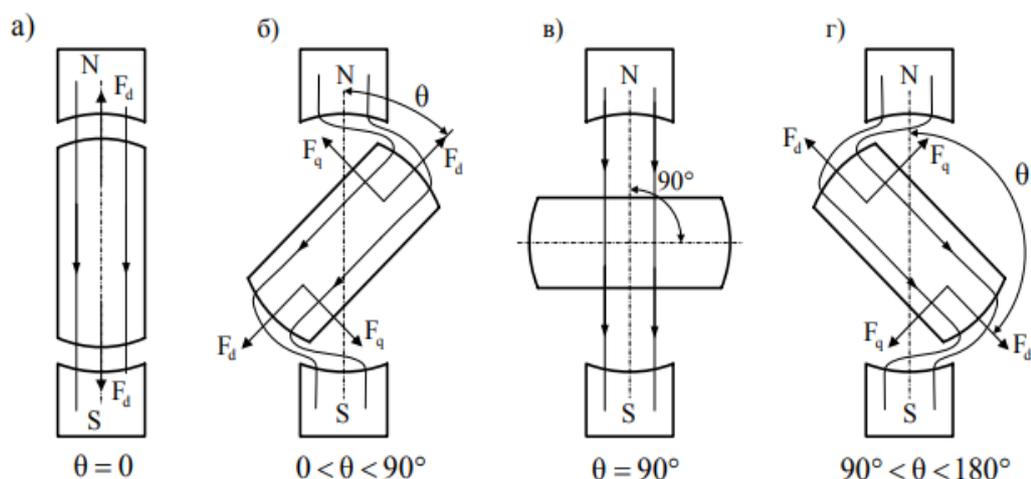
5.2 Синхронды реактивті қозғалтқыш анықтамасы және жұмыс істеу принципі

Синхронды реактивті қозғалтқыш (СРҚ) деген қоздыру орамасы мен тұрақты магниттері жоқ, оның ағыны тек статордың МКК арқылы пайда болатын синхронды қозғалтқышты (СК) атайды. Қозғалтқыштың реактивті деп аталатын айналу моменті машинаның бойлық және көлденең осьтері бойымен бірдей магниттік өткізгіштікке байланысты пайда болады.

Реактивті моменттің физикалық мәнін анықтау үшін статордағы айналмалы магнит өрісін айналмалы тұрақты магнитпен ауыстырып, статикадағы құбылыстарды қарастыру ыңғайлы. Осы мақсатта СОҚ роторының бірнеше өзгерістерін бейнелейміз (5.4 сурет).

5.4, а суретте көрсетілген ротордың орналасуында ротордың осьтері мен өрістері сәйкес келеді. Бұл жағдайда тек F_d радиалды күштері пайда болады және айналу моменті болмайды.

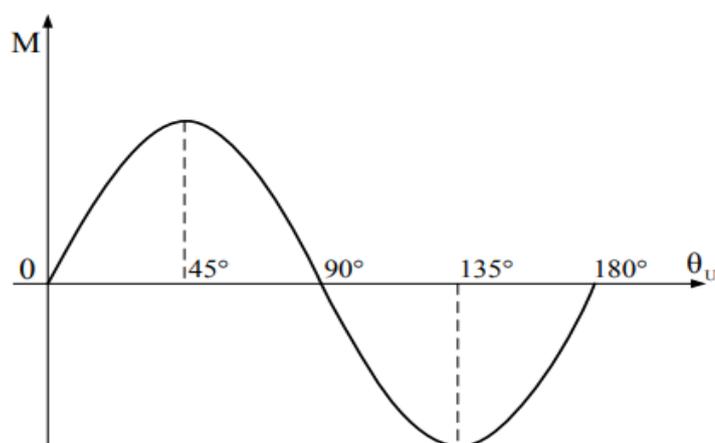
Егер ротор θ бұрышына бұрылса (5.4, б сурет), өрістің деформациясы пайда болады, бұл магниттік сызықтардың ең аз магниттік кедергі жолында жабылуға деген ұмтылысымен түсіндіріледі.



5.4 сурет - Реактивті моменттің пайда болу принципі

Нәтижесінде F_d радиалды күштерінен басқа, M_p реактивті моментін тудыратын F_q тангенциалдық күштері пайда болады. Бұл момент $\theta = 45^\circ$ кезінде максималды мәнге жетеді. Бұрыш мәні $\theta = 90^\circ$ болғанда (5.4, в сурет) ротор тұрақсыз тепе-теңдік жағдайда болады. θ бұрыштың одан әрі ұлғаюымен реактивті моменттің бағыты өзгереді, ал $\theta = 135^\circ$ кезінде ол екінші максималды мәнге жетеді (5.4, г сурет). $\theta = 180^\circ$ кезінде ротор 5.4, а суретте көрсетілгенге ұқсас тұрақты тепе-теңдік жағдайда болады.

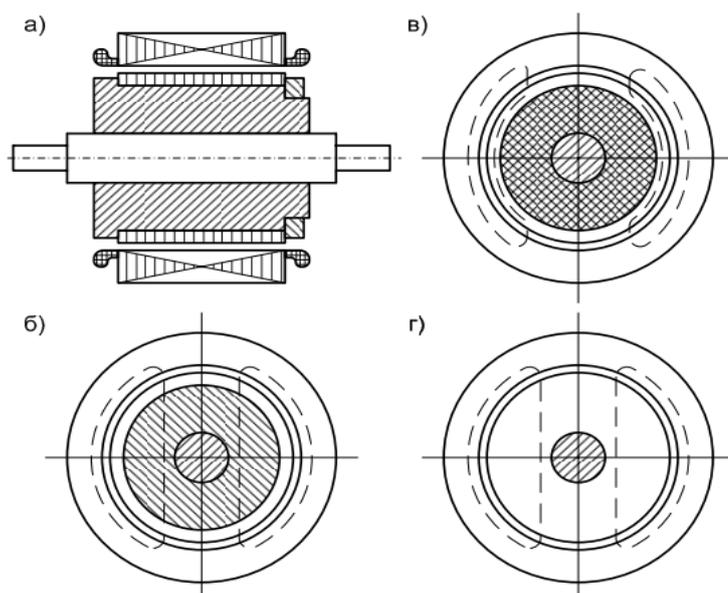
θ бұрыш $180^\circ < \theta < 360^\circ$ шегінде өзгерген кезде M_p реактивті моменттің өзгеру айналымы қайталаынады. Осылайша, қарастырылып отырған жағдайда, роторды бір айналым шегіне бұру кезінде реактивті момент екі кезеңділікпен өзгереді (5.5 сурет). Нақты жағдайларда ротор мен магнит өрісі синхронды түрде айналады, яғни олар бір-біріне қатысты қозғалмайды, сондықтан құбылыстар статикадағыдай жүреді.



5.5 сурет - Статор орамасының белсенді кедергісінің әсерін ескермегендегі синхронды реактивті микроқозғалтқыштың $M = f(\theta)$ тәуелділігі

5.3 Синхронды гистерезистік микроқозғалтқыштарының құрылысы және жұмыс істеу принципі

Синхронды гистерезис қозғалтқышы (СГҚ) - қоздыру орамасы мен тұрақты магниттері жоқ синхронды қозғалтқыш (СК), оның айналмалы магнит өрісі статор өрісінің ротордың қалдық магниттелу өрісімен әрекеттесуі нәтижесінде пайда болады. СГҚ статоры жасырын полюсті болып табылады және әдеттегі синхронды қозғалтқыш пен асинхронды қозғалтқыш статорларының құрылысы бірдей. Статор ойықтарында үш фазалы немесе екі фазалы орам бар. Қозғалтқыштың роторы полюсті емес және гистерезистің кең ілмегі бар магнитті қатты материалдан жасайды [7,8].



5.6 сурет - Гистерезис қозғалтқыштарының құрылымдық түрлері

Ротордың құрастырмалы құрылымы ең көп қолданылды. Бұл жағдайда белсенді бөлік магнитті қатты материалдың сақиналарынан құрылады және қалың қабырғалы цилиндр түрінде втулкаға нығыздалып басылады (5.6, а сурет). Втулканың материалына байланысты гистерезис қозғалтқышының роторы келесі түрге бөлінеді:

а) белсенді бөлік арқылы ағын радиалды түрде тұйықталған кездегі ферромагниттік втулкасы бар ротор (5.6, б сурет);

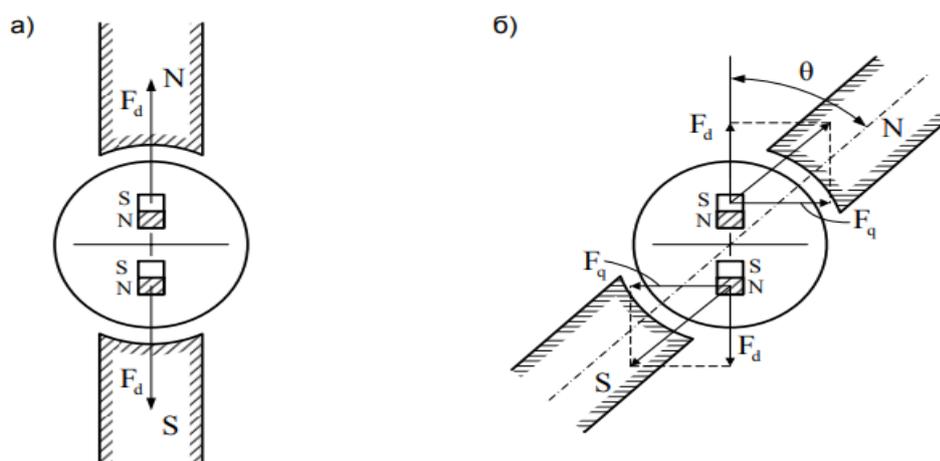
б) магниттік емес втулкасы бар ротор, ағын тангенциалды түрде белсенді бөлік арқылы тұйықталады (5.6, в сурет).

Роторды білікке басылған магнитті қатты материалдан да жасауға болады (5.6, г сурет).

Гистерезис қозғалтқышында пайда болатын (ГҚ) моменттің физикалық мәнін анықтау үшін ротордың белсенді бөлігі қарапайым магниттерден тұрады деп қарастырамыз. Егер мұндай ротор, мысалы, тұрақты магниттермен пайда болатын сыртқы магнит өрісіне орналастырылса, онда барлық қарапайым

магниттер сыртқы магнит өрісінің бағытына сәйкес бұрылады. Басқаша айтқанда, қарапайым магниттердің жалпы өрісінің осі, яғни ротор өрісінің осі сыртқы өрістің осіне сәйкес келеді. Бұл жағдайда тек F_d радиалды күштері пайда болады және айналу моменті болмайды (5.7, а сурет).

Егер сыртқы өрісті айналдырса, онда қарапайым магниттер де айналады. Алайда, ішкі молекулалық үйкелісті ескере отырып, олар сыртқы өріске қатысты біршама кідіріспен айналады. Нәтижесінде ротордың жалпы өріс осі мен сыртқы өріс осі арасында θ бұрышы пайда болады, бұл F_d радиалды күштерінен басқа, F_q тангенциалдық күштерінің пайда болуына әкеледі (5.7, б сурет), олар гистерезис айналу моментін тудырады.



5.7 сурет - Гистерезис қозғалтқышының жұмыс принципін түсіндіруге арналған сұлба

Айналу моменті:

$$M = cF_c\Phi_R \sin\theta, \quad (5.2)$$

мұндағы F_c – статордың МКҚ;

Φ_R – ротордың ағыны;

c – тұрақты коэффициент.

Идеалды гистерезис қозғалтқышының гистерезис моменті айналу жиілігіне тәуелді емес. Бекітілген ротормен статордан роторға берілетін $P_{эм}$ барлық электр магниттік қуаты гистерезис шығындарын жабуға толығымен жұмсалады:

$$P_{эм} = p_r = p_{r0}f_1V, \quad (5.3)$$

мұндағы p_{r0} - нақты гистерезис шығындары, яғни бір магниттеу айналымындағы белсенді бөліктің көлем бірлігіндегі шығындар;

f_1 – магниттелу жиілігі;

V – активті бөліктің көлемі.

Ротор айналғанда гистерезис шығыны азаяды:

$$P_{rs} = p_{r0}fV = p_{r0}f_1V = p_r s, \quad (5.4)$$

мұндағы s – сырғу.

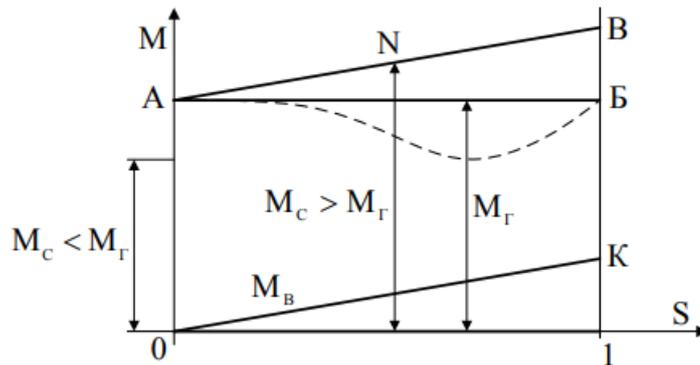
Электр магниттік қуаттың басқа бөлігі механикалық қуатқа айналады:

$$P_{мх} = P_{эм} - P_{rs} = p_{г} - p_{г}s = p_{г}. \quad (5.5)$$

Онда идеалды гистерезис қозғалтқышының айналу моменті:

$$M_{г} = \frac{P_{мх}}{\Omega} = \frac{p_{г}(1-s)}{\Omega_1(1-s)} = \frac{p_{г}}{\Omega_1} = const. \quad (5.6)$$

Бұл жағдайда тәуелділік $M_{г} = f(s)$ абсцисса осіне параллель түзу сызықты көрсетеді (5.8 сурет). Нақты қозғалтқышта $M_{кiр}$ құйынды токтардың моментін ескеру қажет, ал $M_{кiр} = f(s)$ тәуелділігін сызықты деп санауға болады (ОК түзуі). Бұл жағдайда қозғалтқыштың жалпы моменті $M = M_{г} + M_{кiр}$ (5.8 сурет, АВ түзуі).



5.8 сурет - Гистерезис қозғалтқышының механикалық сипаттамасы

Синхронды режимде қозғалтқышты іске қоса алатын максималды момент $M_m = M_{г}$. Егер жүктеме моменті $M_c < M_{г}$ болса, онда идеалды гистерезис қозғалтқышы синхронды айналу жылдамдығына дейін үдетіледі, біртіндеп синхронизмге енеді және толқынға қатысты бірнеше тербелістен кейін статордың МҚК-і тұрақты тепе-теңдік нүктесіне келеді. Егер $M_c > M_{г}$ болса, онда идеалды ГҚ тоқтайды, ал нақты қозғалтқыш асинхронды режимге өтеді (N нүктесі).

Жоғарыда қарастырылған қатынастар статордың қосылуы бойынша МҚК-тің синусоидалы таралуынан және эллипс түріндегі гистерезис циклі бар ГҚ үшін жарамды. Онда МҚК қисығы жоғары кеңістіктік гармоникаға ие, ал магнит өрісі тістердің пульсациясын өткізеді. Бұл кейбір айналу жиіліктерінде және асинхронды режимде жеке гистерезис айналымдарының жоғалуына байланысты тежеу моменттерінің пайда болуына әкеледі. Нәтижесінде $M = f(s)$ механикалық сипаттамасы сәтсіздікке ұшырайды (5.9 суреттегі сызықтық қисық).

5.4 Қадамдық қозғалтқыштар

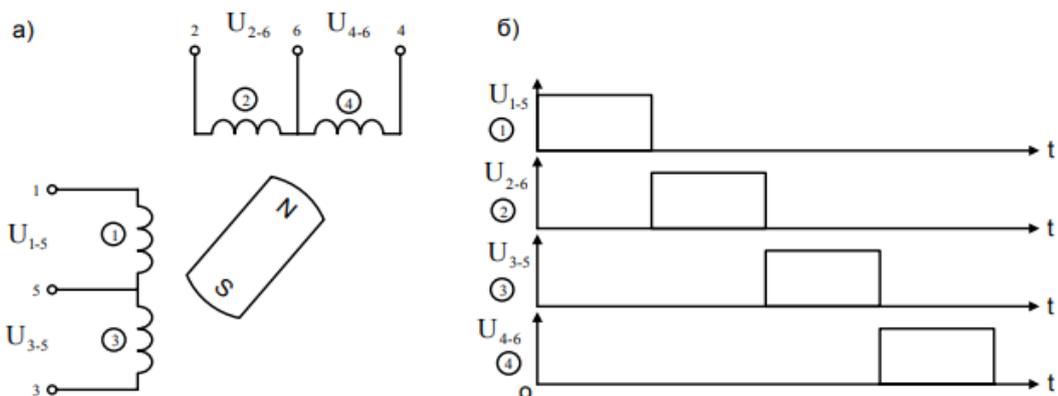
5.4.1 Активті ротордан тұратын қадамдық қозғалтқыш

Қадамдық қозғалтқыш (ҚК) ауа саңылауындағы магнит өрісінің импульстік (дискретті) өзгеру принципіне қозудың импульстік өзгеруіне

(статор орамаларын ауыстыру) байланысты жұмыс істейді. Статор орамаларының айналыммен қайталанатын ауысуларында статор МҚК векторы бекітілген бұрыштарға бұрылып, ротордың бірдей бұрыштарға айналуына әкеледі.

Электр машиналарының кез-келген түрін ҚҚ ретінде пайдалануға болады. Алайда, ҚҚ ретінде тиісті басқару құрылғысы бар синхронды қозғалтқыштарды (СК) қарастырады. ҚҚ-тың синхронды қозғалтқыштан айырмашылығы айналу кезінде ғана емес, сонымен қатар іске қосу, тежеу кезінде де синхрондауға болады, сондай-ақ роторды берілген жағдайларына қарай бекітуге мүмкіндік береді. ҚҚ-ты қоректендіру әдетте бағдарламалық жасақтамасы бар электронды қосқышпен орындалады. ҚҚ электрондық коммутатормен бірге роторды қозғалмайтын күйде бекіту мүмкіндігі бар, яғни айналу жылдамдығын нөлге дейін өзгертетін синхронды қозғалтқыштың басқару жүйесі ретінде орындалады.

Активті роторлы ҚҚ құрылысы бойынша тұрақты магниттермен қоздырылатын синхронды қозғалтқыштарға ұқсас. Мұндай ҚҚ-тың статоры жасырын полюсті, оның ойықтарында басқару орамдары орналастырылған. ҚҚ-тың роторы полюстердің жұптарының саны $2p$ болатын жұлдызша түрінде жасалған тұрақты магнит. Сонымен қатар, орамның қадамын азайту үшін полюстердің ең көп саны алынады.

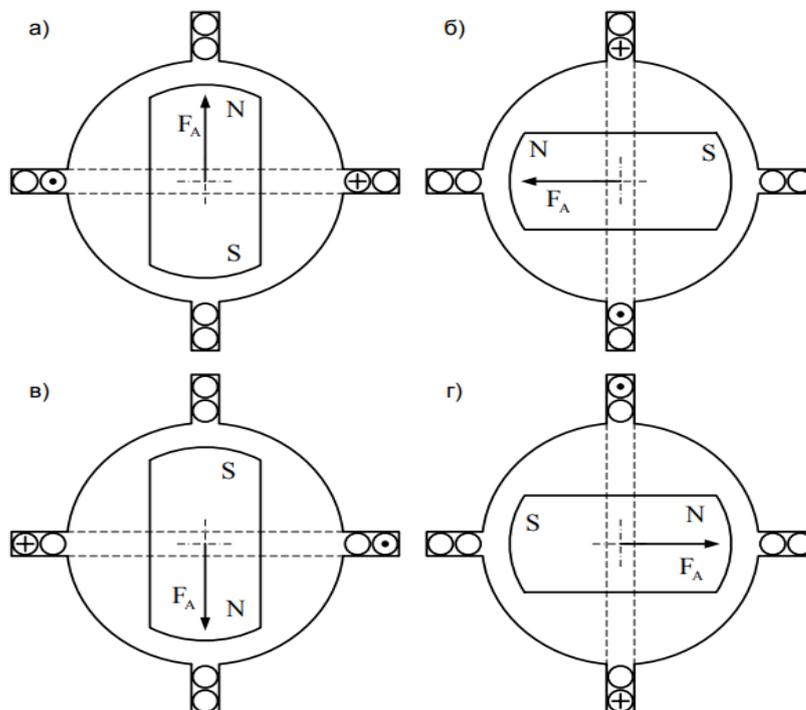


5.9 сурет - (а) - орамалар сұлбасы және (б) - қадамдық қозғалтқышты ауыстыру реті

Екі полюсті екі фазалы синхронды машинаның мысалында ҚҚ-тың жұмыс принципін қарастырамыз (5.9, а сурет). Бұл машинаның фазалық орамалары 90 эл.градусқа кеңістікте қозғалады. Фазалардың ортаңғы нүктелері шығарылады және фазалардың әрқайсысы екі жартылай фазаға бөлінеді, нәтижесінде машина төрт фазалы болады. Өйткені жартылай фазалар бір-біріне қатысты 180 эл. градусқа ығысқан, сондықтан бір полярлы қоректену кезінде МҚК қарама-қарсы бағытта сол бұрышқа ығысады.

Бірполярлы қоректену кезінде жартылай фазаларды ауыстыру үдерісін және үш тактілі коммутацияны қарастырамыз. Бұл жағдайда қозғалтқыштың 5.9, а суретте келтірілген сұлбасын ескере отырып, яғни, берілген кернеу

диаграммасын ескере отырып, оның жұмыс принципін қарастырамыз. Жартылай фазалардағы кернеудің өзгеру диаграммасына сәйкес келетін ротордың төрт жағдайдағын 5.10 суретте бейнелейміз.



5.10 сурет - Фазалық ауысулар кезіндегі фазалардың тұрақты күйлері

Статор орамдары әдетте $q = 1$ болатын екі полюсті ретінде шоғырланған. 1-ші жартылай фазалық қосылғанда, F_a статорының ЭҚК векторы жартылай фазалық оське орнатылады және ротор тұрақты күйде болады (5.10, а сурет). 1-ші жартылай фазаны өшіріп, 2-ші жартылай фазаны қосқанда F_a ЭҚК векторы 90 эл.градус бұрышына бұрылады. Ротор осі мен статор өрісі арасында сәйкессіздік $\theta = 90$ электронды градус бұрышы пайда болады, бұл $M_m \sin\theta$ синхрондау моментінің пайда болуына әкеледі, оның салдарынан ротор осы бұрышқа бұрылады (5.10, б сурет). 2-ші жартылай фазаны, 3-ші жартылай фазаны қосқанда, 3-ші жартылай фаза статор мен ротордың ЭҚК-ін одан әрі бұрылуын тудырады (5.10, в, г суреттер).

Осылайша, қарастырылып отырған жағдайда ротор бір айналымда төрт тұрақты жағдайда болады, нәтижесінде коммутация төрт тактілі деп аталады.

Бұл жағдайда әр өлшемде бір жартылай фаза қосылады. Жартылай фазалардың жұптастыруы: 1-2; 2-3; 3-4; 4-1.

Егер ауа саңылауындағы ротор мен статор өрістерінің таралуы синусоидалы болса, онда синхрондау моменті:

$$M = M_m \sin\theta = p D L I W_1 B_{\delta m R} \sin\theta, \quad (5.7)$$

мұндағы: p – полюстер жұбының саны;

D – ротордың диаметрі;

L – ротордың ұзындығы;

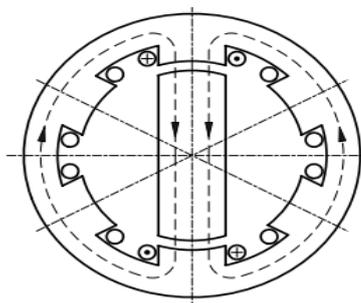
I - басқару орамының тогы;

W_1 – басқару орамының тармақтар саны;

$B_{\delta mR}$ – ауа саңылауындағы ротор индукциясының максималды мәні.

5.4.2 Реактивті қадамдық қозғалтқыш

Реактивті ротордан тұратын қадамдық қозғалтқышты (ҚК) қоздыру орамасы мен тұрақты магниттері жоқ ротормен жұмыс істеу принципін қарастырамыз. Статорда 6 полюсті қадамдар бар делік, олардың әрқайсысында басқару орамының орауыштары бар (5.11 сурет). Бұл жағдайда ротор екі полюсті, ол төрт полюсті болуы да мүмкін [9].



5.11 сурет – Синхронды реактивті қадамдық қозғалтқыш

Қозғалтқышта 3 басқару орамасы бар, олардың әрқайсысы екі қарама-қарсы полюсте орналасқан 2 тізбектей жалғанған орауыштардан тұрады. Басқау орамын қоректендіру коммутатор арқылы импульстермен белгілі бір ретпен жүзеге асырылады. Бұл жағдайда статор шеңбері бойымен белгілі бір қадамдармен өтетін статор өрісі пайда болады, одан кейін ротор тиісті бұрыштарға ауысады. Басқару орамы бөлек қоректенгенде бұл бұрыштар 60° - қа тең, ал жеке-бірлескен түрде қоректендірілгенде бұрыштар -30° тең.

Ротордың айналуы реактивті момент арқылы орындалады, ол басқару орамы ажыратылып қосылғаннан кейін роторды тұрақты күйге келтіруге тырысады. Бұл жағдайда ротордың тұрақты позициясы статор ағынының ең үлкен магниттік өткізгіштігіне сәйкес келеді.

Электр магниттік моментті ауа саңылауында шоғырланған электр магниттік энергияның өзгеру дәрежесіне қарай анықтауға болады:

$$M = \frac{dA}{d\theta_m} = \frac{pdA(\theta_c)}{d\theta_c}, \quad (5.8)$$

мұндағы: p – ротордың полюстер жұбының саны;

$\theta = \frac{\theta_c}{p}$ - геометриялық градуустағы сәйкессіздік бұрышы;

θ_c - электрлік градуустағы сәйкессіздік бұрышы.

Реактивті ҚК-та:

$$p = \frac{Z_R}{2}. \quad (5.9)$$

Электр магниттік энергия:

$$A = \frac{1}{2} Li^2. \quad (5.10)$$

мұндағы: L – басқару орамының индуктивтілігі;
 i – басқару орамындағы ток.

$$L = \frac{\psi_s}{i}. \quad (5.11)$$

мұндағы: ψ_s – басқару орамының ағымдық ілесімі.
 Басқару орамының ЭҚК-і:

$$F_s = 2W_s i, \quad (5.12)$$

мұндағы: W_s – басқару орамының тармақтар саны;
 Онда электр магниттік энергия:

$$A = \frac{1}{2} \frac{2W_s \Phi i^2}{i} = \frac{1}{2} F_s \Phi. \quad (5.13)$$

Статор ағымы:

$$\Phi = F_s \lambda. \quad (5.14)$$

мұндағы: λ – ауа саңылауының магниттік өткізгіштігі.
 Онда:

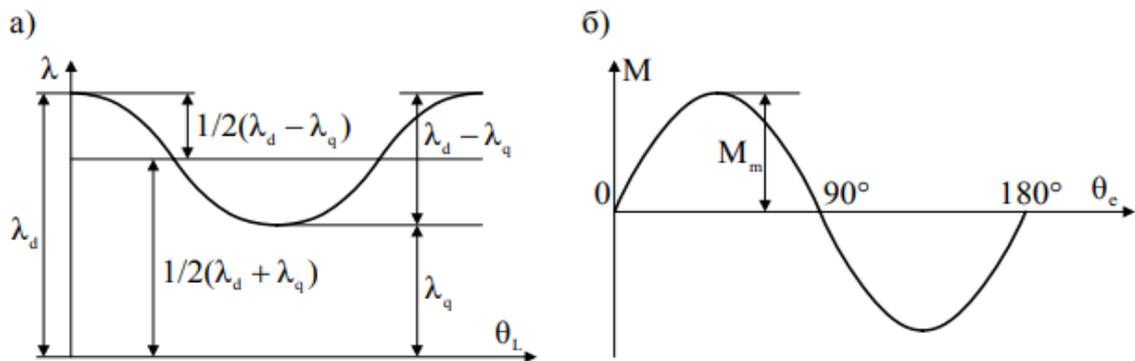
$$A = \frac{1}{2} F_s^2 \lambda. \quad (5.15)$$

Реактивті ҚҚ-тың синхрондаушы моменті:

$$M = \frac{Z_R}{4} F_s^2 \frac{d\lambda}{d\theta_c}. \quad (5.16)$$

Егер тізбектің қанықтылығын және ауа саңылауындағы өрістің кеңістіктік гармоникасының әсерін елемейтін болсақ, онда (5.12, а сурет):

$$\lambda = \frac{1}{2} (\lambda_d + \lambda_q) + \frac{1}{2} (\lambda_d - \lambda_q) \cos 2\theta_c. \quad (5.17)$$



5.12 сурет - Реактивті қадамдық қозғалтқыштың айналу моменті

Нәтижесінде λ -ны (5.16) теңдеуіне қойып, келесі теңдеуді аламыз (5.12, б сурет):

$$M = \frac{Z_R}{4} F_s^2 (\lambda_d - \lambda_q) \sin 2\theta_c = M_m \sin 2\theta_c. \quad (5.18)$$

Бақылау сұрақтары

- 1.1 Ротордың құрылысы мен қоздыру әдісіне байланысты СМҚ-ң түрлері.
- 1.2 Синхронды қозғалтқыштың радиалды құрылымы.
- 1.3 Қысқа тұйықталған орамалы синхронды қозғалтқыштың тұрақты магниттінің осьтік орналасуы және іске қосылуы.
- 1.4 Реактивті моменттің пайда болу принципі.
- 1.5 Гистерезис қозғалтқыштарының құрылымдық түрлері.
- 1.6 Гистерезис қозғалтқышының механикалық сипаттамасы.
- 1.7 Синхронды реактивті қадамдық қозғалтқыш анықтамасы.
- 1.8 Гистерезис қозғалтқышының жұмыс принципі.

6 Коллекторлы микроқозғалтқыштар

6.1 Жалпы түсініктемелері

Коллекторлы микроқозғалтқыштарға тұрақты ток қозғалтқыштары, айнымалы ток қозғалтқыштары және әмбебап қозғалтқыштар кіреді (тұрақты ток пен айнымалы ток желісінде жұмыс істеуге арналған). Олардың қуаты төменгі ваттан жүздеген ваттқа дейін болады және тұрмыстық техника мен автоматика жүйелерінде кеңінен қолданылады. Бұл қозғалтқыштардың қуатын өнеркәсіптік айнымалы ток желілерінен және автономды желілерден алуға болады.

Асинхронды және синхронды микроқозғалтқыштармен салыстырғанда коллекторлы микроқозғалтқыштардың артықшылықтары:

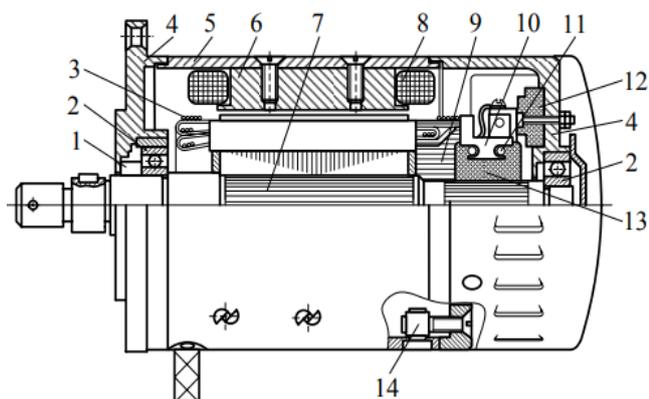
- 1) Ауқымды қолданыста айналу жиілігін реттеудің тегістігі мен үнемділігі;
- 2) ПӘК салыстырмалы түрде жоғары;
- 3) Іске қосу моменті үлкен;
- 4) Өлшемі мен салмағы шағын.

Магниттік жүйе көлемді тұтас немесе шихталанған полюстері бар қатты болат түрінде орындалады. Қозғалтқыш зәкірі қалыңдығы 0,35 және 0,5 мм электр техникалық болат парақтарынымен жиналады. Зәкірдің ойықтары дөңгелек, айқын емес трапеция тәрізді жартылай жабық түрінде орындалады.

Коллектор коллекторлық тақталарды пластикалық втулкаға басу арқылы алынған түйін.

Тұрақты ток микроқозғалтқыштарының айналу жылдамдығы $n = 500-1000$ айн/мин.

Төмен қуатты тұрақты ток қозғалтқышының жалпы көрінісі 6.1 суретте көрсетілген.



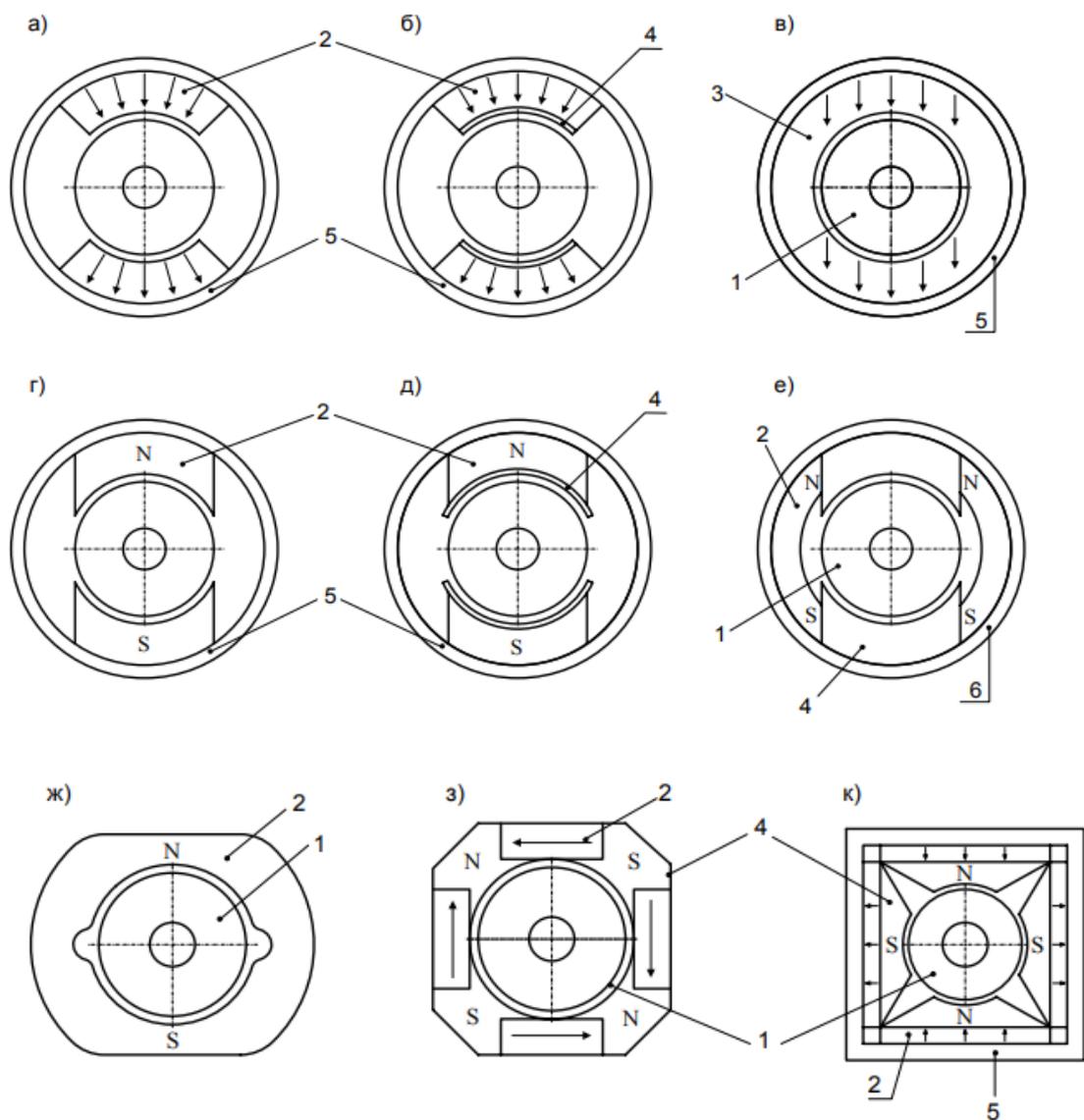
1 - мойынтірек қақпағы; 2 - шарикті мойынтірек; 3 – бандаж; 4 – мойынтірек қалқаны; 5 – корпус; 6 – полюс; 7 – білік; 8 – қоздыру орамы; 9 – орама мен біліктің кез келген бөлігі оқшаулағыш толтыру; 10 - коллектор; 11 - коллектордың арматуралық сақинасы; 12 – траверс; 13 - білікті коллектор жағынан оқшаулау; 14 - мойынтірек қалқандарын бекітуге арналған бөлік.

6.1 сурет - Төменгі қуатты тұрақты ток электр қозғалтқышының жалпы көрінісі

Тұрақты ток микроқозғалтқыштары электр магнит арқыл немесе тұрақты магниттер арқылы қоздырылуы мүмкін. Бірінші жағдайда параллельді немесе тізбектей қоздыру қолданылады. Шағын көлемді машиналарда аралас қозу қолданылмайды. Тұрақты магниттермен қоздырылатын тұрақты токтың коллекторлық микроқозғалтқыштарында қозғалмайтын индукторы бар және якорьдің ішкі орналасуы 1 болатын магниттік жүйелер, яғни электр магниттік қоздыру машиналарының түріне сәйкес жасалған магниттік жүйелер кеңінен қолданылады (6.2 сурет).

Сонымен қатар, қарапайым және арзан микроқозғалтқыштарды қоздыру үшін феррит қосылыстарының тұрақты магниттері кеңінен қолданылады, олар сақина сегменті 2 немесе сақина 3 түрінде болады, сонымен қатар, радиалды немесе диаметрлі бағытта магниттеледі (6.3, а, б, в суреттер). Магниттердің тікбұрышты пішіні де қолдануы мүмкін (6.3, г, д суреттер).

Көбінесе магниттер 4 магнитті жұмсақ ұштармен қамтамасыз етіледі. Олар зәкірдің көлденең әсерінен өрістің қалдық деформациясының пайда болуын болдырмайды. Бұл жағдайда зәкір әсерінің ағыны магнитті айналып өтіп, ұшына тұйықталады. Магнитті жұмсақ материалдан жасалған 5 қозғалтқыш корпусы (ядро) әдетте цилиндр тәрізді болады.



6.2 сурет - Тұрақты магниттері бар электр микроқозғалтқыштардың магниттік өткізгіштерінің құрылымдық сұлбалары

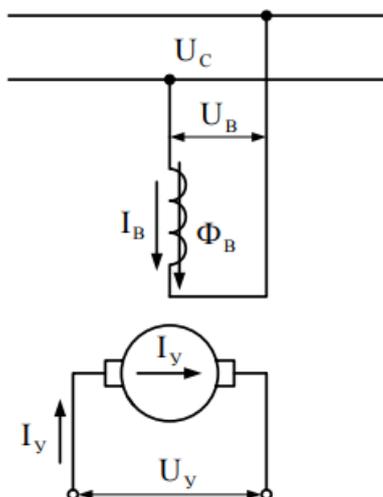
6.2 Атқарушы тұрақты ток қозғалтқыштары

6.2.1 Зәкірмен басқарылатын тұрақты ток қозғалтқыштары

Автоматты басқару және реттеу жүйелерінде айнымалы токтың атқарушы қозғалтқыштарымен қатар тұрақты токтың атқарушы қозғалтқыштары да кеңінен қолданылды. Оларда электр магниттік және тұрақты магниттермен қоздырылуы мүмкін. Бірінші жағдайда зәкір орамасы (зәкірді басқару) немесе полюсті орау (полюсті басқару) басқару орамасы ретінде қолданылады. Тұрақты магнитпен қоздырылғанда тек зәкірді басқаруды қолдануға болады.

Зәкірді басқарудың ерекшеліктерін қарастырамыз. Бұл жағдайда электр магниттік қоздыру кезінде полюстердің орамасы қозу орамасы болып табылады. Ол қозғалтқыштың бүкіл жұмысы кезінде $U_e = U_c = const$ кернеуімен

үнемі желіге қосылған күйде болады, ал зәкірді айналдыру қажет болған кезде зәкір орамасына U_6 басқару кернеуі беріледі. Зәкірмен басқарылатын атқарушы тұрақты тоқты қозғалтқыштың қосылу сұлбасы 6.3 суретте көрсетілген.



6.3 сурет – Зәкірлі басқарылатын микроқозғалтқыштың сұлбасы

Егер магниттік тізбектің қанықтылығы мен зәкір реакциясының әсері ескерілмесе, онда қоздыру ағыны полюстердің орамасының тогына пропорционалды немесе осы орамның тұрақты кедергісі қоздыру кернеуіне пропорционалды:

$$\Phi_K \sim I_K \sim U_K; \quad (6.1)$$

немесе

$$\Phi_K \sim k_\phi U_K. \quad (6.2)$$

мұндағы

k_ϕ – тұрақты шама.

Басқару кернеуінің қоздыру кернеуіне қатынасы болып табылатын сигнал коэффициенті:

$$\alpha = \frac{U_6}{U_K}. \quad (6.3)$$

Тұрақты токты қозғалтқыштың моменті:

$$M = C_M \Phi_K I_6 = C_M k_\phi U_K I_6. \quad (6.4)$$

немесе

$$M = C_M k_\phi U_K \frac{U_6 - E}{r_6}, \quad (6.5)$$

мұндағы:

$$E = C_e \Phi_K n = C_e k_\phi U_K n. \quad (6.6)$$

Сонда:

$$M = C_M k_\phi U_K \frac{\alpha U_K - C_e k_\phi U_K n}{r_6} = \frac{C_e k_\phi U_K^2}{r_6} (\alpha - C_e k_\phi n). \quad (6.7)$$

Қозғалмайтын зәкірде ($N = 0$) және $\alpha = 1$, яғни базалық моментті қабылдай отырып, моментті салыстырмалы бірлікте жазамыз:

$$M_{\text{ко}} = \frac{C_e k_\phi U_K^2}{r_K}. \quad (6.8)$$

Сонда

$$m = \frac{M}{M_{\text{ко}}} = (\alpha - C_e k_\phi n). \quad (6.9)$$

$m = 0$ және $\alpha = 1$ сәйкес келетін идеалды бос жүрістің айналу жылдамдығы:

$$n_0 = \frac{1}{C_e k_\phi}. \quad (6.10)$$

Нәтижесінде моментке қатысты теңдеу:

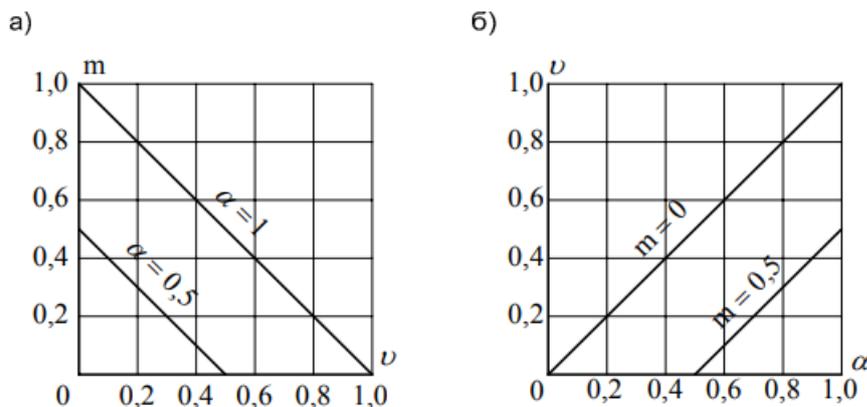
$$m = (\alpha - \frac{n}{n_0}) = (\alpha - v). \quad (6.11)$$

Соңғы өрнекке сәйкес, механикалық сипаттамаларын құруға болады, яғни $\alpha = \text{const}$ кезінде $m = f(v)$ тәуелділіктері. Бұл сипаттамалар сызықты және оларды нүктелер бойынша салуға болады:

Қысқа тұйықталу нүктесі: $v = 0, m = \alpha$;

Бос жүріс нүктесі: $v_6 = \alpha, m = 0$.

6.4 суретте сигналдың $\alpha = 1$ және $\alpha = 0,5$ екі коэффициенті үшін механикалық сипаттамалар бейнеленген.



6.4 сурет – Зәкірмен басқарылатын тұрақты ток қозғалтқышының салыстырмалы (а) механикалық және (б) реттеу сипаттамалары

Реттеу сипаттамасының теңдеуін алу үшін, яғни $m = \text{const}$ кезінде $v = f(\alpha)$ тәуелділік теңдеуін алу үшін (6.11) теңдеуін келесідей жазамыз:

$$v = \alpha - m. \quad (6.12)$$

Бұл өрнектен реттеу сипаттамалары сызықты және екі нүкте бойынша құрылуы мүмкін екендігі шығады:

$$\begin{aligned}v &= 0, \alpha - m; \\v &= 1 - m, \alpha = 1.\end{aligned}\tag{6.13}$$

6.4, б суретте $m = 0$ және $m = 0,5$ кездегі реттемелік сипаттамалар көрсетілген. Сигнал коэффициенті $\alpha = m$ болғанда зәкір айнала бастайды, бұл жағдайда іске қосылу кернеуі анықталады.

Зәкірлі басқарылатын атқарушы тұрақты токты қозғалтқыштың артықшылығы механикалық және реттемелік сипаттамалардың сызықтығы [1].

Басқару қуаты:

$$P_6 = U_6 I_6 = U_6 (U_6 - E_6) r_6,\tag{6.14}$$

немесе

$$P_6 = \frac{\alpha^2 U_K^2}{r_6} - \frac{\alpha v^2 U_K^2}{r_6}.\tag{6.15}$$

Бұл қуатты базалық қуат ретінде қабылдап, бірлік қатынас түрінде жазуға болады:

$$P_{6к} = \frac{U_K^2}{r_6}.\tag{6.16}$$

Сонда басқару қуатының қатынастық теңдеуі:

$$P = \frac{P_6}{P_{6к}} = \alpha^2 - v\alpha.\tag{6.17}$$

Осы теңдеуді ескере отырып, келесі сипаттамаларды тұрғызуға болады:

$$P_6 = f(v) \text{ болғанда } \alpha = const;$$

$$P_6 = f(\alpha) \text{ болғанда } v = const.$$

Мұндағы бірінші тәуелділік сызықты функция, ал екіншісі сигнал коэффициенті жоғарылаған сайын басқару қуатының күрт өзгеруін сипаттайды.

Толық қатыстық механикалық қуат (механикалық және желдеткіш шығындарын қосқанда):

$$P'_R = mv = (\alpha - v)v = \alpha v - v^2.\tag{6.18}$$

Іске қосу кезінде және бос жүрісте бұл қуат нөлге тең және v_m жылдамдығында максимум мәнінде болады. (6.18) теңдеуін v бойынша дифференциалдап және туындыны нөлге теңестіріп келесі теңдеуді анықтаймыз:

$$\frac{dP'_R}{dv} = \alpha - 2v_m = 0,\tag{6.19}$$

осыдан

$$v_m = \frac{\alpha}{2}.\tag{6.20}$$

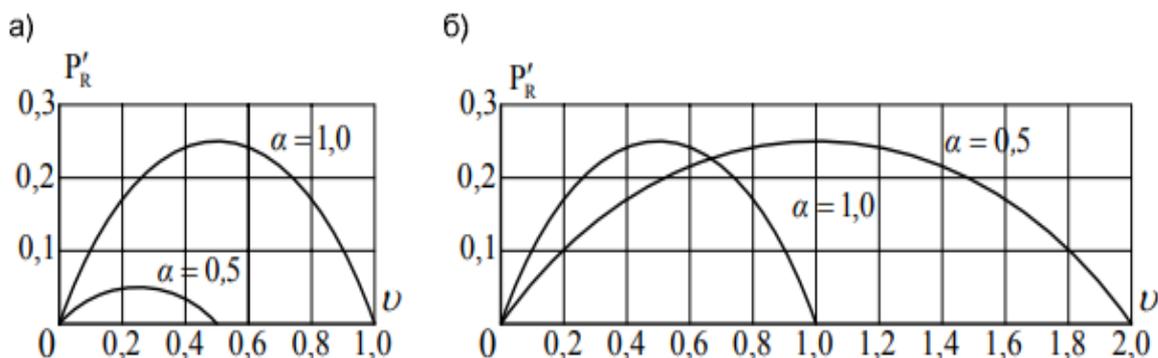
Максималды қуат:

$$P'_{Rm} = \frac{\alpha^2}{2} - \frac{\alpha^2}{4} = \frac{\alpha^2}{4}. \quad (6.21)$$

6.5 суретте $\alpha = 1$ және $\alpha = 0,5$ екі сигнал коэффициенті үшін $p'_R = f(v)$ тәуелділіктері көрсетілген:

$$\alpha = 1, P'_{Rm} = 0,25;$$

$$\alpha = 0,5, P'_{Rm} = 0,0625.$$

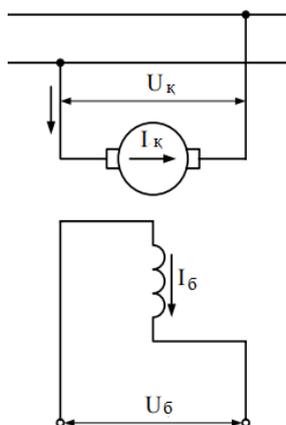


6.5 сурет – Механикалық қуаттың (а) зәкірлік және полюсті (б) басқару кезіндегі айналу жылдамдығына тәуелділігі

6.2.2 Полюсті басқарылатын тұрақты ток қозғалтқыштары

Полюсті басқару кезінде басқару орамасы полюстердің орамасы, ал өріс орамасы зәкір орамасы болады. Соңғысы кернеуі $U_k = U_{ж} = \text{const}$ тұрақты желіге қосылған. $n = 0$ кезінде якорь тогын шектеу мақсатында қосымша кедергі зәкір орамасымен тізбектей қосылады. Зәкірді айналдыру кезінде ғана өрістер орамына кернеу беріледі.

Өрісті басқарылатын тұрақты ток қозғалтқышының (АТҚ) сұлбасы 6.6 суретте көрсетілген [1].



6.6 сурет - Өрісті басқарумен атқарушы қозғалтқышының сұлбасы

Егер магниттік тізбектің қанығуы мен зәкір әсерін елемейтін болсақ:

$$\Phi_{\delta} = k_{\phi} U_{\delta} = k_{\phi} \alpha U_{\kappa}. \quad (6.22)$$

мұндағы $\alpha = \frac{U_{\delta}}{U_{\kappa}}$ – сигнал коэффициенті.

Электр магниттік момент:

$$M = C_M \Phi_{\delta} I_{\kappa} = C_M k_{\phi} \alpha U_{\kappa} I_{\delta}. \quad (6.23)$$

Зәкір тогы:

$$I_{\delta} = \frac{U_{\kappa} - E_{\kappa}}{r_{\kappa}}. \quad (6.24)$$

мұндағы:

$$E_{\kappa} = C_e \Phi_{\delta} n = C_e k_{\phi} \alpha U_{\kappa} n, \quad (6.25)$$

Онда:

$$I_{\delta} = \frac{U_{\kappa} - C_e k_{\phi} \alpha U_{\kappa} n}{r_{\kappa}}. \quad (6.26)$$

I_{δ} мәнін (6.23) теңдеуге қойып, келесі теңдеуді аламыз:

$$M = C_e k_{\phi} \alpha U_{\kappa} \frac{U_{\kappa} - C_e k_{\phi} \alpha U_{\kappa} n}{r_{\kappa}} = \frac{C_M k_{\phi} U_{\kappa}^2}{r_{\kappa}} (\alpha - \alpha^2 C_e k_{\phi} n). \quad (6.27)$$

$n = 0$ және $\alpha = 1$ кезінде момент бірлігі ретінде оның шамасын қабылдасақ:

$$M_{\text{ко}} = \frac{C_M k_{\phi} U_{\kappa}^2}{r_{\kappa}}, \quad (6.28)$$

Онда моменттің қатыстық мәні:

$$m = \frac{M}{M_{\text{ко}}} = \alpha - \alpha^2 C_e k_{\phi} n, \quad (6.29)$$

$\frac{1}{n_0} = C_e k_{\phi}$, $v = \frac{n}{n_0}$ болғандықтан, онда:

$$m = \alpha - \alpha^2 v. \quad (6.30)$$

Соңғы өрнек механикалық сипаттаманың теңдеуі болып табылады, ол $\alpha = \text{const}$ кезінде $v = f(v)$ қатынасын білдіреді. Бұл сипаттама сызықтық функция болып табылады және оны екі нүкте бойынша құруға болады:

Қысқа тұйықталу нүктесі: $v = 0$, $m = \alpha$;

Идеалды бос жүріс нүктесі: $m = 0, v_6 = \frac{\alpha - m}{\alpha^2}$.

6.7, а суретте және $\alpha = 1$ және $\alpha = 0,5$ екі мәні үшін механикалық сипаттамалар бейнеленген. Бұл жағдайда, зәкірмен басқарудан айырмашылығы, механикалық сипаттамалардың параллельдігі жоқ. $\alpha < 1$ кезінде олар жұмсақ сипатта болады.

(6.30) теңдеуге сәйкес реттеу сипаттамасына қатысты теңдеуді келесідей жазуға болады:

$$v_6 = \frac{\alpha - m}{\alpha^2}. \quad (6.31)$$

Осы теңдеуден көрініп тұрғандай, өрісті басқарылатын АТҚ-тың реттеу сипаттамасы, яғни $m = \text{const}$ кезіндегі $v = f(\alpha)$ тәуелділігі α сигнал коэффициентінің сызықтық функциясы емес. Сонымен қатар, нөлге жақын моменттерде ол сызықты емес, сонымен қатар $\alpha = \alpha_m$ мәнінде максимумға ие. α_m мәнін анықтау үшін v -ны α -мен дифференциалдап және туындыны нөлге теңестіріп келесі теңдеуді аламыз:

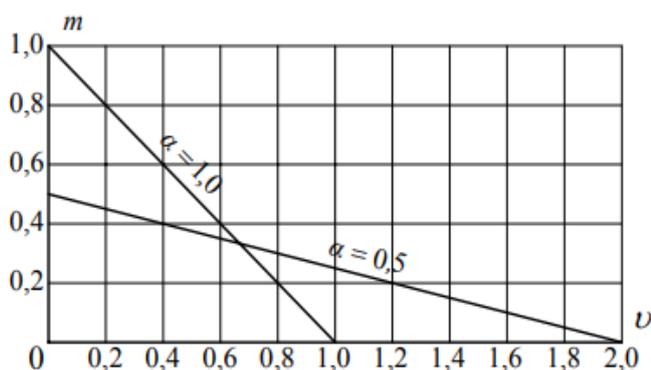
$$\alpha_m^2 - (\alpha_m - m)2\alpha_m = 0, \quad (6.32)$$

осыдан:

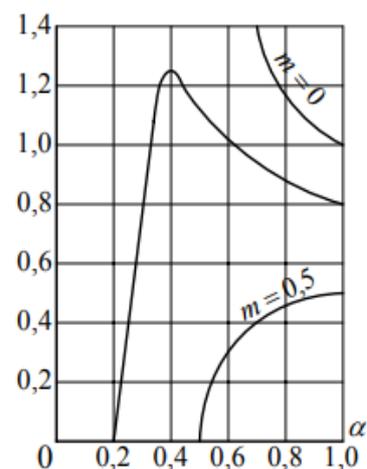
$$\alpha_m = 2m \quad \text{және} \quad v_m = \frac{1}{4m}. \quad (6.33)$$

6.7, б суретте $m = 0,2$ және $m = 0,5$ болғанда және жартылай $m = 0$ кезіндегі реттеу сипаттамалары көрсетілген.

а)



б)



6.7 сурет - Зәкірмен басқарылатын тұрақты ток қозғалтқышының салыстырмалы механикалық (а) және реттемелік (б) сипаттамалары

Бұл жағдайда іске қосу кернеуі, зәкірдегі басқару сияқты, $v = \text{const}$ ($\alpha = m$) кезіндегі қарсылық моментімен анықталады.

Бұл жағдайда қоздыру қуаты зәкір қуаты болып табылады:

$$P_{\kappa} = U_{\kappa} I_{\kappa} = \frac{U_{\kappa}(U_{\kappa} - E_{\kappa})}{r_{\kappa}}. \quad (6.34)$$

Бұл қуат номиналды қуаттың (70...95)% құрайды, үлкен мәндер (200...250) Вт номиналды қуаты машиналарға, ал кішілері номиналды қуаты (5...7) Вт қозғалтқыштарға қатысты.

Басқару қуаты тек полюстердің орамасындағы электр шығындарын жабуға жұмсалады:

$$P_{\sigma} = I_{\sigma}^2 r_{\sigma} = \frac{\alpha^2 U_{\kappa}^2}{r_{\kappa}}. \quad (6.35)$$

Бұл қуат аз, болғандықтан полюсті басқарылатын АТҚ-тың артықшылығы болып саналады.

Салыстырмалы бірліктердегі толық механикалық қуат:

$$p'_R = mv = (\alpha - \alpha^2 v)v = \alpha v - \alpha^2 v^2, \quad (6.36)$$

p'_R - ты v дифференциалдап, туындыны нөлге теңестіріп, v_m айналу жылдамдығын анықтаймыз, онда механикалық қуат жоғарғы мәнде болады:

$$\alpha - 2v_m \alpha^2 = 0, \quad (6.37)$$

Осыдан:

$$v_m = \frac{1}{2\alpha} = \frac{v_{\sigma}}{2}, \quad (6.38)$$

Толық механикалық қуаттың жоғарғы мәні:

$$P'_{Rm} = \alpha \frac{1}{2\alpha} - \alpha^2 \frac{1}{4\alpha^2} = \frac{1}{4}. \quad (6.39)$$

6.5, б суретте екі $\alpha = 1$ және $\alpha = 0,5$ мәндері үшін $P'_R = f(v)$ тәуелділіктері көрсетілген. Сонымен, полюсті басқарылатын АТҚ-пен пайда болатын механикалық қуаттың максималдылығы сигнал коэффициентіне тәуелді емес (6.5, б сурет).

6.3 Тұрақты магниттермен қоздырылатын тұрақты токты атқарушы қозғалтқыштары

Тұрақты магниттермен қоздырылатын АТҚ-да, жоғарыда қарастырылған электр магниттік қоздырылатын АТҚ-ға қарағанда, негізгі ағын әдетте статорда орналасқан тұрақты магниттермен пайда болады. Осыған байланысты олар тек зәкірді басқаруда жұмыс істей алады [6].

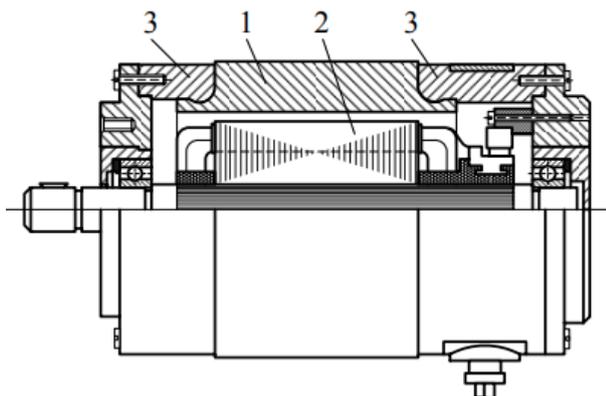
Қоздыру орамасының болмауы қоздыру кезіндегі қуаттың шығынын болдырмайды, бұл төменгі қуатты қозғалтқыштарда тиімділіктің артуына ықпал етеді. Сонымен қатар, қарастырылып отырған қозғалтқыштардың артықшылықтарына қоздыру орамы үшін қорктендіру көзінің болмауы,

сонымен қатар ағынның температураның өзгеруіне және желі кернеуінің ауытқуына толық тәуелсіздігі жатады.

Температура режимінің шарттарына сәйкес қоздыру шығындарының болмауы қозғалтқыштың температурасын жоғарылатпай зәкір тоғын арттыруға мүмкіндік береді, бұл оның көлемін арттырмай берілген қуатты арттыруға мүмкіндік береді. Коммутация жағдайларын жақсарту үшін бұл жағдайда зәкір орамдары секциялардың ең көп санымен, ал коллекторлар коллекторлық пластиналардың көп санымен орындалады.

Іс жүзінде сыртқы сақиналы магнитті және тісті зәкірден тұратын тұрақты токты микроқозғалтқыштар кеңінен қолданылды. Мұндай қозғалтқыштардың түрі ДПМ типті қозғалтқыштар. Олар әртүрлі машиналар мен механизмдерді жүргізу үшін, сонымен қатар автоматика жүйелерінде атқарушы қозғалтқыштар ретінде қолданылады.

Қозғалтқыштың құрылысы цилиндрлік пішінді құйылған тұрақты магниттен (ЮНДК қорытпасынан (темір-никель-алюмин негізіндегі қорытпа)) тұрады, оның ұштарына мырыш қорытпасынан жасалған соңғы бөліктер құйылады. Соңғысына мырыш қорытпасынан жасалған мойынтірек қалқандары бекітіледі, оларға мойынтіректері бар бөлігі құйылады (6.8 сурет).



1 - тұрақты магнит; 2 - коллекторы бар зәкір; 3 - мырыш қорытпасынан жасалған құрылымның соңғы бөлігі.

6.8 сурет - ДПМ сериялы қозғалтқыш

Қозғалтқыштар сызықты механикалық сипаттамалардан, іске қосудың төменгі кернеуінен және $T_M = 30...40$ мс. электр механикалық уақыт тұрақтысынан тұрады.

Мұндай қозғалтқыштардың құны тұрақты магниттерді өндіруге кететін магнитті қатты материалдардың жоғарғы құны мен тапшылығына байланысты, сондай-ақ механикалық өңдеудегі қиындықтар электр магниттік қоздыру қозғалтқыштарының құнынан асып кетуі мүмкін. Құнның төмендеуіне салыстырмалы түрде арзан, меншікті энергиясы жоғары ферритобарийлі магниттерді қолдану арқылы қол жеткізуге болады.

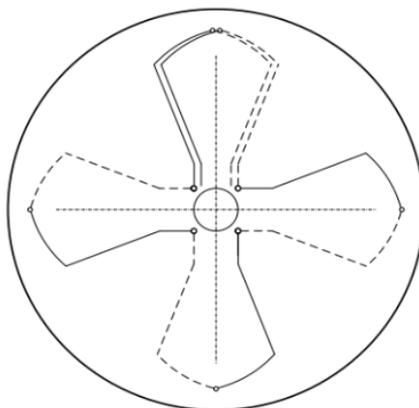
6.4 Төменгі инерциалы тұрақты токты қозғалтқыштар

6.4.1 Басылған зәкір орамасынан тұратын төменгі инерциялы қозғалтқыштар

Жоғарыда қарастырылған атқарушы тұрақты ток қозғалтқыштарында инерция моменті жоғарылаған массивті тісті зәкірден тұрады, бұл олардың өнімділігін төмендетеді. Осыған байланысты төменгі инерциялы атқарушы тұрақты токты қозғалтқыштар көбірек қолданысқа ие. Олар 3 топтан тұрады [6]:

- а) диск зәкірінен тұратын;
- б) қуыс цилиндрлік зәкірден тұратын;
- в) тегіс зәкірден тұратын.

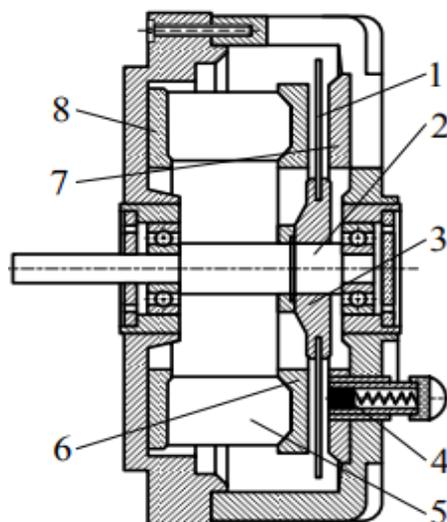
Диск зәкірінен тұратын атқарушы тұрақты токты қозғалтқыштың құрылымы мен жұмыс принципін қарастырамыз. Диск шыны талшық сияқты оқшаулағыш материалдан жасалады. Дискінің екі жағына, әдетте, электрохимиялық әдіспен мыс фольгадан жасалған және дискінің радиалды бағытында орналасқан жұқа өткізгіш-пластиналардан тұратын баспалы орамасы орнатылады. Статор орамасының бөлімі екі жарты бөлімнен тұрады, олардың біреуі дискінің бір жағында, екіншісі оның екінші жағында орналасады. Жартылай бөліктер дискідегі тесіктер арқылы кез келген бөліктерде өзара байланысады (6.9 сурет).



6.9 сурет – Басылған орамнан тұратын диск тәрізді зәкір

Қозғалтқышты қоздыру өрістің ұштары бар осьтік орналасқан тұрақты магниттермен жүзеге асырылады. Тұрақты магниттер тудыратын ағын ауа саңылауында орналасқан орамалы дискіге еніп, сақиналы магниттік сыммен тұйықталады (6.10 сурет). Зәкір орамасының өткізгіш токтарының өрістердің магнит өрісімен өзара әрекеттесуі нәтижесінде әдеттегі тұрақты ток қозғалтқышындағыдай айналу моменті пайда болады. Коллектордың рөлін күміс-графит щеткалары сырғанайтын өткізгіштер орындайды, бұл тегіс

баспалы орамасының тез тозуына әкеледі. Осыған байланысты диск тәрізді қозғалтқыштар көбінесе коллектормен жасалады.



1 – диск тәрізді зәкір; 2 - білік; 3 - втулка; 4 - щеткалар; 5 - тұрақты магниттер; 6 – полюстер ұштары; 7, 8 - сақиналы магниттік өткізгіштер.

6.10 сурет - Басылған орамадан тұратын диск тәрізді тұрақты ток қозғалтқышы

Дискінің диаметрі ұлғайған сайын оның инерция моменті артады, бұл қозғалтқыштың жылдамдығын төмендетеді. Сонымен қатар, температураның аса жоғарылауының салдарынан диск қисаюуы мүмкін. Осыған байланысты қозғалтқыштың қуаты жоғарылайтындықтан көп қозғалтқыштан тұратын немесе қуыс зәкірден тұратын атқарушы тұрақты токты қолдану қажет.

Қуыс зәкірлі атқарушы тұрақты токты қозғалтқыш құрылысы қуыс зәкірі атқарушы асинхронды қозғалтқышға ұқсас. Олар екі статордан тұрады: тұрақты ток машинасының статорына ұқсас сыртқы статор және негізгі магнит ағыны жолындағы магниттік кедергіні азайтатын ішкі статор. Бұл ретте қарастырылып отырған электр магниттік қоздырудан тұратын атқарушы тұрақты токты қозғалтқыштың сыртқы статоры электр техникалық болат табақшалармен жиналатын станиналар мен полюстерден тұрады. Сыртқы және ішкі статорлардың арасындағы ауа саңылауында оқшаулағыш материалдан жасалған стакан түрінде жасалған, басылған орамадан тұратын қуыс зәкір айналады. Ораманың жарты бөліктерінің бірі қуыс зәкірдің сыртқы бетінде, ал екіншісі оның ішкі бетінде орналасқан. Жартылай бөліктер зәкірдегі тесіктер арқылы көлденең бір-бірімен байланысады. Бұл жағдайда пайда болған бөліктер коллекторға қосылады.

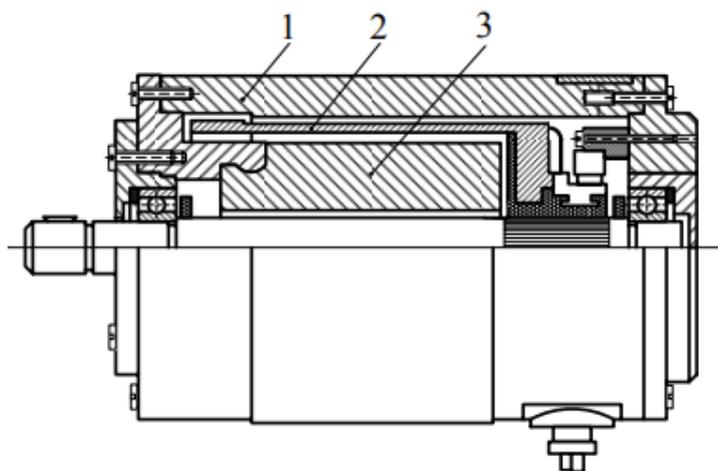
Басылған ораманың артықшылықтары: якорь орамаларын жасау үшін баспа схемаларын пайдалану қозғалтқыштың көлемін азайтуға, оның тиімділігін арттыруға және жылу таратуды жақсартуға мүмкіндік береді.

Сонымен қатар, бұл өндіріс үдерісін автоматтандыруға және орамалардың сапасын жақсартуға мүмкіндік береді.

6.4.2 Әдеттегі зәкір орамасынан тұратын төменгі инерциялы тұрақты ток қозғалтқыштары

Басылған орамадан тұратын төменгі инерциялы қозғалтқыштармен қатар, әдеттегі зәкір орамасынан тұратын қозғалтқыштар кең қолданысқа ие. Олар цилиндр және диск тәрізді зәкірлермен шығарылады. Мұндай қозғалтқыштардың зәкір орамдары эмальмен оқшауланған қарапайым жұқа сыммен дайындалады. Орамалар цилиндр немесе диск тәрізді каркастан жасалады, сонымен қатар эпоксидті смала негізінде терморезистивті қоспамен сіндіріледі, одан кейін қоспа пішінделіп, полимерленгеннен кейін монолитті цилиндрге немесе дискіге ұқсас түрде болады. Зәкір орамасының бөлімдерінің ұштары коллекторлық пластиналарға бекітіледі.

Қазіргі кезде цилиндрлі қуыс зәкірден тұратын қозғалтқыштардың бірқатар сериялары жасалып, шығарылады. Соның ішінде ДПР (аз қуатты коллекторлы ТТҚ) сериялы қозғалтқыштарда 3 тұрақты магнит 2 қуыс зәкірдің ішіне орналастырылады, ал 1 корпус бір уақытта магнит өткізгіш ретінде қызмет етеді (6.11 сурет).



1 - корпус; 2 - кәдімгі қуыс зәкір орамасы; 3 - тұрақты магнит.

6.11 сурет - ДПР сериялы қозғалтқыш

ДПР сериясы 0,12...37 Вт қуатқа дейінгі аймақты қамтиды. Бұл сериядағы қозғалтқыштардың ПӘК-і тісті зәкірі бар ДПР сериялы қозғалтқыштарға қарағанда 15...25% жоғары. ДПР сериялы қозғалтқыштардың электр механикалық уақыт тұрақтысы ДПМ сериялы қозғалтқыштардан қарағанда 2...2,5 есе аз.

6.4.3 Тегіс зәкірден тұратын атқарушы тұрақты токты қозғалтқыш

Бұл қозғалтқыштардың инерциясы төмен болып келеді. Олардың электр механикалық уақыт тұрақтылығы (4...10) мс шегінде болады.

Әдеттегі тұрақты ток қозғалтқыштар жылдамдығының жоғарылауы рұқсат етілген электр магниттік жүктемелермен, инерцияның маңызды моментімен және коммутациялық шектеулерге байланысты төмен жүктеме қабілетімен шектеледі. Бұл жағдайда негізгі шектеуші факторы зәкірдің тісті аймағының болуы. Осыған байланысты бірқатар жағдайларда тегіс зәкірден тұратын тұрақты токты атқарушы қозғалтқыштарын қолдануды қажет етеді.

Зәкірдің тегіс құрылымы машинаның саңылауындағы индукцияны тісті құрылыммен салыстырғанда 2-3 есе арттыруға мүмкіндік береді, онда саңылаудағы индукция тістердің қанықтылығымен шектеледі.

Өткізгіштердің ашық орналасуы және тістерде шығынның болмауы зәкір орамасының салқындалу жағдайларын жақсартады, бұл жылу жүктемесін арттыруға мүмкіндік береді.

Айтарлықтай ауа аралығы зәкір әсерінің негізгі өріске әсерін әлсіретуге, зәкір орамасының индуктивтілігін төмендетуге ықпал етеді, бұл коммутация жағдайларының жақсаруына және шамадан тыс жүктеме қабілетінің 8 - 10 есеге дейін артуына әкеледі. Зәкір әсерінің айқын болмауы сипаттаманың сызықтығын тудырады $M = f(I)$.

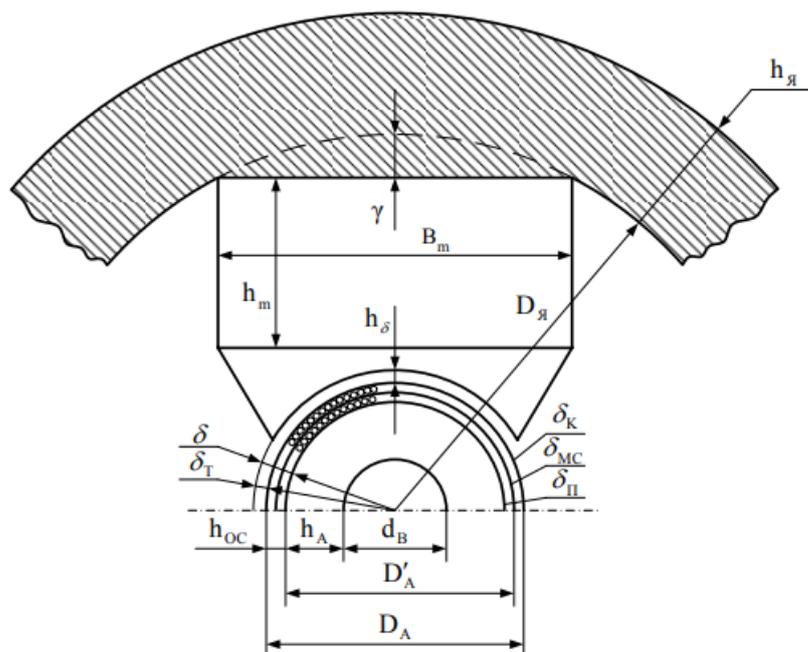
Коммутациялық қасиеттердің жақсаруы ұзартылған зәкірді орындауға мүмкіндік береді, онда инерция моменті едәуір төмендейді, бұл электр магниттік жүктемелердің жоғарылауымен тегіс зәкірден тұратын атқарушы тұрақты токты қозғалтқыштың тез әсерлігін жоғарылатады.

Алайда, магниттік тізбектің жекелеген бөліктеріндегі үлкен магниттік емес алшақтық пен елеулі индукциялар қуатты қоздыру жүйесін қажет етеді. Осыған байланысты салмақтық көрсеткіштер бойынша тегіс зәкірлі машиналар кейбір жағдайларда әдеттегі қозғалтқыштарынан төмен.

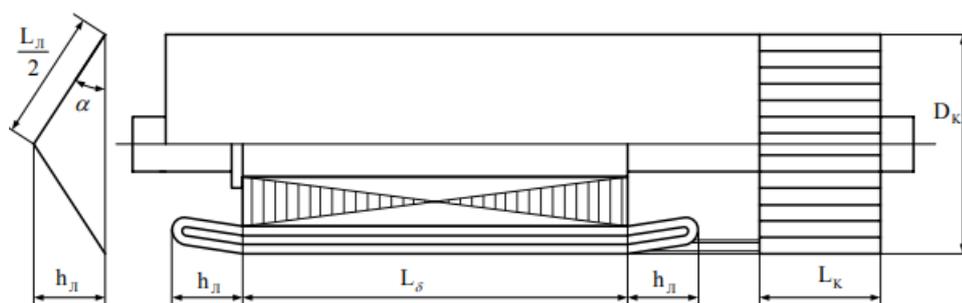
Тегіс зәкір қалыңдығы 0,5 немесе 0,35 мм электр болатының парақтарымен жаслады. Білік материалы 36НХТЮ немесе ХІ8Н9Т типті магнитті емес болат болып табылады. Шыны таспамен немесе шыны талшықпен оқшауланған зәкірдің беті шеңбер бойымен біркелкі орналастырылады, ол жоғарғы толтыру коэффициентімен орам қабатын құрайды ($h_{o.c}$). Орам эмальмен оқшауланған дөңгелек қималы сыммен жасалады. Ораманың қабаттары арасында оқшаулау салынған (6.12 және 6.13 суреттер).

Төселген орамасы бар зәкір шыны немесе шыны таспамен жасалып, вакуумдалады және ыстыққа төзімді қосылыс түрінде қысыммен құйылады.

Атқарушы тұрақты токты қозғалтқышты қоздыру құйылған магнитті қатты қорытпалармен (ЮН15Ж25БА, ЮНДК35Т5БА типті) тұрақты магниттермен жүзеге асырылады.



6.12 сурет - Тегіс зәкірден тұратын тұрақты ток қозғалтқышының көлденең қимасы



6.13 сурет - Тегіс зәкірден тұратын тұрақты ток қозғалтқышының бойлық қимасы

Тегіс зәкірден тұратын атқарушы тұрақты токты қозғалтқыштың магниттік жүйелерінің құрылымдық сұлбалары әр түрлі болады. Алайда, магниттердің радиалды орналасуы бар магниттік индуктордың құрылымы ең көп таралған, ол тұрақты магниттер бекітілген сыртқы ярма тәріді болады (6.13 сурет). Ауа саңылауына қараған магниттердің ұштарында магнит ағынының концентраторлары рөлін атқаратын және бір мезгілде зәкірдің әсері ағындарын айналып өтуге арналған магнитті жұмсақ полюсті ұштары болады.

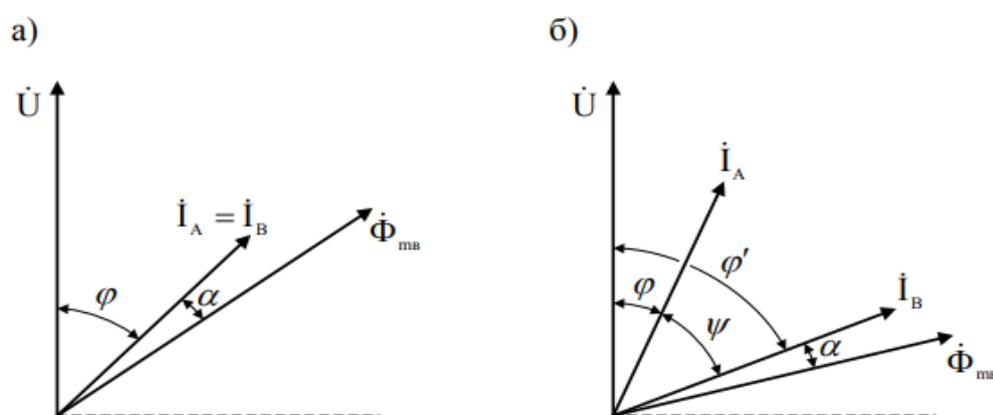
6.5 Әмбебап коллекторлы қозғалтқыштар

Әмбебап коллекторлық қозғалтқыш (ӘКҚ) айнымалы және тұрақты ток желісімен жұмыс істеуге арналған қозғалтқыш.

Қозғалтқыштың айнымалы ток желісімен жұмыс істеу мүмкіндігі зәкір тогы мен ағын бір уақытта өзгергенде моменттің лездік мәнінің белгісі іс жүзінде өзгеріссіз қалатындығымен түсіндіріледі, нәтижесінде моменттің орташа мәні оң мән болып табылады [2]:

$$m = C_m(\pm i_a)(\pm \Phi) > 0 \text{ және } M > 0. \quad (6.40)$$

Негізінде, ӘКҚ параллель немесе тізбектей қоздырылуы мүмкін. Әдетте, олар тізбекті қоздырылуымен шығарылады. Зәкірдің кернеуі мен тогы арасындағы φ бұрыш зәкір орамасының жалпы индуктивтілігімен және оған тізбектей қосылған, салыстырмалы түрде аз бұрылыстары бар қоздыру орамасымен анықталады (6.9, а сурет).



6.9 сурет - Тізбектей (а) және параллель (б) қоздырылатын ӘКҚ-ың векторлық диаграммалары

Параллель қозу кезінде соңғысының төменгі индуктивтілігіне байланысты зәкір тогы қозу тогымен салыстырғанда кернеуден төмен бұрышқа артта қалады, яғни $\varphi < \varphi'$ (6.9, б сурет). Токтар арасында $\psi = \varphi' - \varphi$ фазалық ысу пайда болады.

Сәйкесінше зәкір тогы мен ағынының лездік мәндері:

$$i_a = \sqrt{2}I_a \sin \omega t \text{ және } \Phi = \Phi_{mB} \sin(\omega t - \psi - \alpha). \quad (6.41)$$

Одан кейін электр магниттік моменттің лездік мәні:

$$\begin{aligned} m &= C_m I_a \Phi = \sqrt{2}I_a \Phi_{mB} \sin \omega t \sin(\omega t - \psi - \alpha) = \\ &= C_m \Phi_{mB} \frac{\sqrt{2}}{2} I_a [\cos(\psi + \alpha) - \cos(2\omega t - \psi - \alpha)]. \end{aligned} \quad (6.42)$$

мұндағы C_m – зәкір орамының тұрақты коэффициенті;

Φ_{mB} – ағынның амплитудасы;

I_a – зәкір тогының мәні;

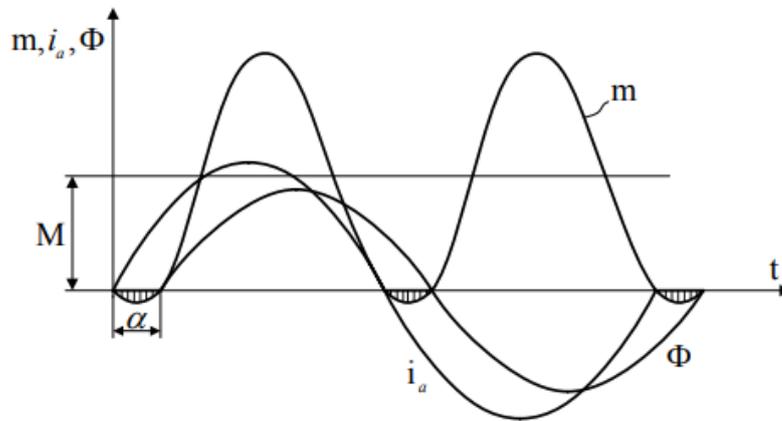
α – магнит өзекшесіндегі магниттік шығындарға қатысты бұрыш.
Бір период кезіндегі моменттің орташа мәні:

$$M = \frac{1}{T} \int_0^T C_M \Phi i_a dt = \frac{C_M}{\sqrt{2}} \Phi_{mB} I_a \cos(\psi + \alpha). \quad (6.43)$$

Тізбектей қоздырылатын ӘҚК-да $\psi = 0$ болғандықтан, оның моменті параллель қоздырылатын ӘҚК моментінен үлкен болады:

$$M = \frac{C_M}{\sqrt{2}} \Phi_{mB} I_a \cos \alpha. \quad (6.44)$$

I_a , Φ , $m = f(t)$ тәуелділіктері және ӘҚК моментінің орташа мәні 6.10 суретте көрсетілген.



6.10 сурет – ӘҚК-ың айналу моментін қалыптастыру принципі

Әмбебап коллекторлық қозғалтқыш (ӘҚК) жұмыс істеп тұрған кезде, онда Φ_{mB} және Φ_{mq} амплитудасы бар екі пульсациялық ағын пайда болады. Біріншісі W_b' бұрылыстарының санымен қозу орамасының осі бойымен, ал екіншісі зәкір әсерінің ағыны щеткалар осі бойымен пульсацияланады (6.11 сурет).

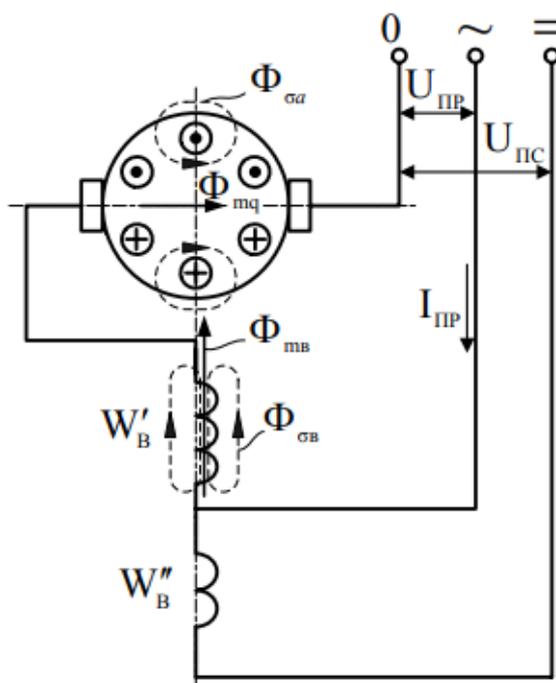
Бұл ағындар өздігінен индукцияланған ӘҚК-ін (трансформаторлық ӘҚК) қоздыру және зәкір орамдарында тудырады:

$$E_K = 4,44 f_1 W_K' \Phi_{mB}; \quad (6.45)$$

$$E_q = 4,44 k_{opa} W_a f_1 \Phi_{mq}, \quad (6.46)$$

мұндағы $W_a = \frac{N}{4a}$ – зәкір орам тармағының саны;

$k_{opa} = \frac{2}{\pi}$ – зәкір орамының орам коэффициенті.



6.11 сурет – ЭҚК-ың принципалдық сұлбасы

Сонымен қатар, зәкір айналғанда, оның өткізгіштері қозудың пульсациялық ағынымен түйісу салдарынан оның орамында айналмалы ЭҚК-і пайда болады:

$$E_{\text{ай}} = \frac{pn_{\text{кел}}}{60} \frac{N}{a} \frac{\Phi_{\text{тв}}}{\sqrt{2}} = C_e n_{\text{кел}} \Phi_{\text{тв}}, \quad (6.47)$$

мұндағы N – зәкір орамының өткізгіштер саны;

$n_{\text{кел}}$ – зәкірдің айналу жиілігі, айн/мин.

Электр қозғалтқышының қысқыштарына $U_{\text{кел}}$ келтірілген кернеу $E_{\text{в}}$, E_{q} , $E_{\text{ай}}$ ЭҚК-мен, зәкір және $I_{\text{кел}}(r_a + r'_b)$ қоздыру тізбегіндегі белсенді кедергідегі кернеудің түсуімен және зәкір мен қоздыру орамаларындағы $I_{\text{кел}}(x_{\sigma a} + x_{\sigma b})$ индуктивті кедергінің шашырауымен теңестіріледі. Содан кейін Кирхгофтың екінші заңы бойынша айналмалы зәкір тізбегіндегі ЭҚК тепе теңдік теңдеуі:

$$U_{\text{кел}} + E_{\text{в}} + E_{\text{q}} + E_{\text{ай}} = I_{\text{кел}}(r_a + r'_b) + jI_{\text{кел}}(x_{\sigma a} + x_{\sigma b}), \quad (6.48)$$

немесе

$$U_{\text{кел}} = -E_{\text{в}} - E_{\text{q}} - E_{\text{ай}} + I_{\text{кел}}(r_a + r'_b) + jI_{\text{кел}}(x_{\sigma a} + x_{\sigma b}). \quad (6.49)$$

Осы теңдеуге сәйкес ЭҚК айнымалы ток желісімен жұмыс істеген кезде кернеуінің векторлық диаграммасы тұрғызылған (6.9 сурет). Егер кішкене α бұрышы ескерілмесе, онда векторлық диаграмма оның түрін біршама өзгертеді және қозғалтқыш зәкірінің айналу жиілігін келесідей анықтауға болады:

$$n_{\text{кел}} = \frac{E_{\text{кел}}\sqrt{2}}{C_e\Phi_{\text{мВ}}} = \frac{U_{\text{кел}}\cos\varphi - I_{\text{кел}}(r_a + r_b')}{C_e\Phi_{\text{мВ}}} = \frac{E_{\text{айн}}}{C_e\Phi_{\text{мВ}}/\sqrt{2}} \quad (6.50)$$

мұндағы $C_e = \frac{N p}{60 a}$ – зәкір орамының тұрақты коэффициенті;

$$E_{\text{айн}} = U_{\text{кел}}\cos\varphi - I_{\text{кел}}(r_a + r_b').$$

ӘКҚ тұрақты ток желісімен жұмыс істеген кезде зәкірдің айналу ӘКҚ:

$$E_{\text{пс}} - I_{\text{пс}}(r_a + r_b' + r_b'') > E_{\text{айн}}, \quad (6.51)$$

Қолданыстағы ток:

$$I_{\text{пс}} = \frac{U_{\text{пс}} - E_{\text{пс}}}{r_a + r_b' + r_b''} < I_{\text{кел}}, \quad (6.52)$$

Тұрақты ток желісімен қозғалтқыш жұмыс істеп тұрған кездегі зәкірдің айналу жиілігі:

$$n_{\text{пс}} = \frac{U_{\text{пс}} - I_{\text{пс}}(r_a + r_b' + r_b'')}{C_e\Phi_{\text{В,пс}}}. \quad (6.53)$$

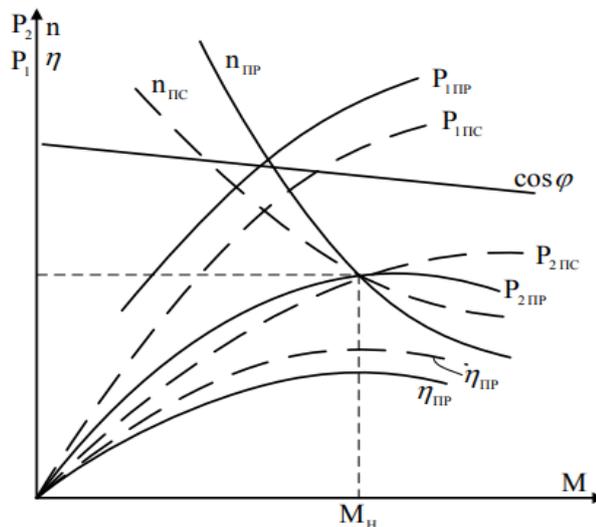
$E_{\text{пс}} > E_{\text{айн}}$ болғандықтан, тұрақты және айнымалы ток желілерімен жұмыс істегенде қозғалтқыштың бірдей айналу жиілігін алу үшін бірдей номиналды қуат қажет:

$$\Phi_{\text{В,пс}} > \frac{\Phi_{\text{мВ}}}{\sqrt{2}}. \quad (6.54)$$

Осылайша, қозғалтқыш тұрақты ток желісімен жұмыс істегенде, ағынды күшейту үшін полюстерге $W_{\text{в}}''$ бұрылыстарының саны бар қосымша ораманы орналастыру керек, ол $W_{\text{в}}'$ айнымалы ток қоздыру орамасымен тізбектей қосылады. Онда номиналды жүктеме кезінде:

$$n = n_{\text{пс}} = n_{\text{кел}} = \frac{E_{\text{пс}}}{C_e\Phi_{\text{В,пс}}} \frac{E_{\text{айн}}\sqrt{2}}{C_e\Phi_{\text{мВ}}}. \quad (6.55)$$

$U = \text{const}$ болғанда P_1 , I , P_2 , n , η , $\cos\varphi = f(M)$ тәуелді жұмыс сипаттамалары 6.12 суретте көрсетілген.



6.12 сурет – ӘКҚ-ың жұмыстық сипаттамалары

Бақылау сұрақтары

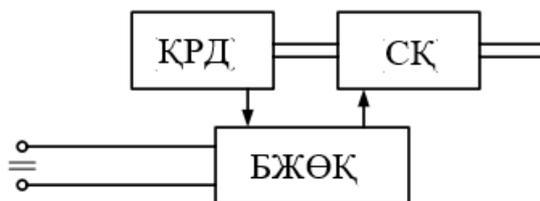
- 1.1 Асинхронды және синхронды микроқозғалтқыштармен салыстырғанда коллекторлы микроқозғалтқыштардың артықшылықтары.
- 1.2 Тұрақты токты қозғалтқыштың зәкірмен басқарудың ерекшеліктері.
- 1.3 Зәкірмен басқарылатын тұрақты ток қозғалтқышының салыстырмалы механикалық және реттеу сипаттамалары.
- 1.4 Полюсті басқарылатын тұрақты ток қозғалтқышының түсініктемесі.
- 1.5 Тұрақты магниттермен қоздырылатын тұрақты токты атқарушы қозғалтқышының түсініктемесі.
- 1.6 Инерциялы атқарушы тұрақты токты қозғалтқыштың түрлері.
- 1.7 Диск зәкірінен тұратын атқарушы тұрақты токты қозғалтқыштың құрылымы мен жұмыс принципі.
- 1.8 ӘКҚ-ың айналу моментін қалыптастыру принципі.

7 Вентильді тұрақты токты қозғалтқыш

7.1 Вентильді тұрақты токты қозғалтқыштың құрылысы

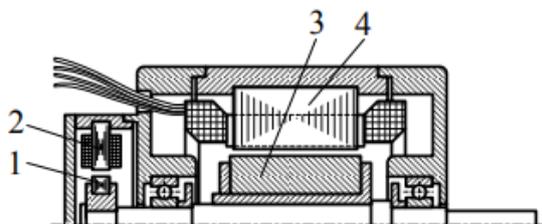
Жоғарыда қарастырылған тұрақты ток коллекторлық қозғалтқыштарының кемшілігі қозғалтқыштың сенімділігі мен қызмет ету мерзімін төмендететін, радио кедергісін тудыратын, қозғалтқышты қоршаған орта жағдайларына сезімтал ететін щетка-коллекторлық қондырғының болуы. Осыған байланысты щетка коллекторлық түйін орнына басқарылатын жартылай өткізгіштік коммутатор қолданылатын вентильді тұрақты ток қозғалтқышын (ВТТҚ) қолданған жақсырақ. ВТТҚ үш негізгі функционалды элементтерді қамтиды:

1. Үш фазалы синхронды қозғалтқыш (СҚ) түріндегі атқарушы элемент;
2. Ауыспалы жартылай өткізгіш элементтерде (транзисторлар, тиристорлар) орындалған басқарылатын жартылай өткізгіш қосқыш (БЖӨҚ);
3. Қозғалтқыш роторының фазалық орамаларға қатысты орналасу датчигі (ҚРД), зәкір орамасының секцияларының ауысу реті мен моментін анықтайтын логикалық элемент болып табылады (7.1 сурет).

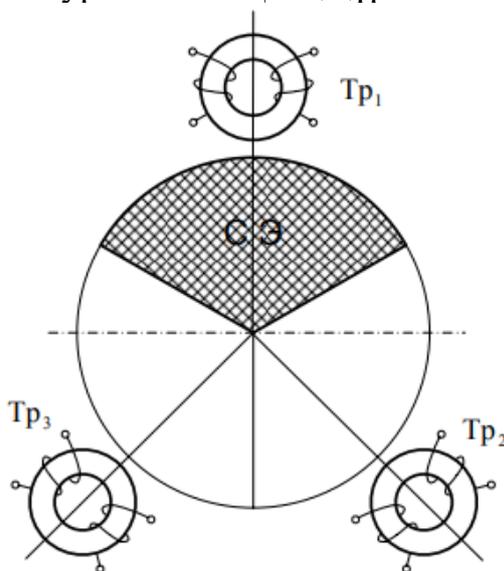


7.1 сурет – Тұрақты токты вентильді қозғалтқыштың функционалды сұлбасы

7.2 суретте ВТТҚ-ың құрылымдық сұлбасы көрсетілген. Синхронды қозғалтқыш статоры қозғалтқыш роторы датчигінің (ҚРД) статорымен бір корпусқа орналастырылған, оған сезімтал элементтері (СЭ) орналасқан. Қазіргі уақытта электр магниттік типтегі сезімтал элементтері бар, дроссель және трансформатор типті ҚРД кеңінен қолданылады. Сезімтал элементтердің магниттік өткізгіштері бір (дроссель датчигі) немесе екі (трансформатор датчигі) орауыштар орналастырылған сақиналар тәрізді электр техникалық болаттан немесе ферриттен жасалады (7.3 сурет).



7.2 сурет – ВТТҚ-ың құрылымы



7.3 сурет – Жағдай датчигінің сұлбасы

ҚРД-нің роторында сегмент тәрізді тұрақты магниттер түрінде сигнал элементтері (СЭ) орналастырылған. Басқару ротор айналғанда сигналдық элементтермен сезімтал элементтерінің магниттік тізбектерін магниттеу арқылы жүзеге асырылады. Дроссельді магниттеу кезінде оның кедергісі төмендейді, ал трансформатор датчигі жағдайында орамалар арасындағы байланыс тоқтайды.

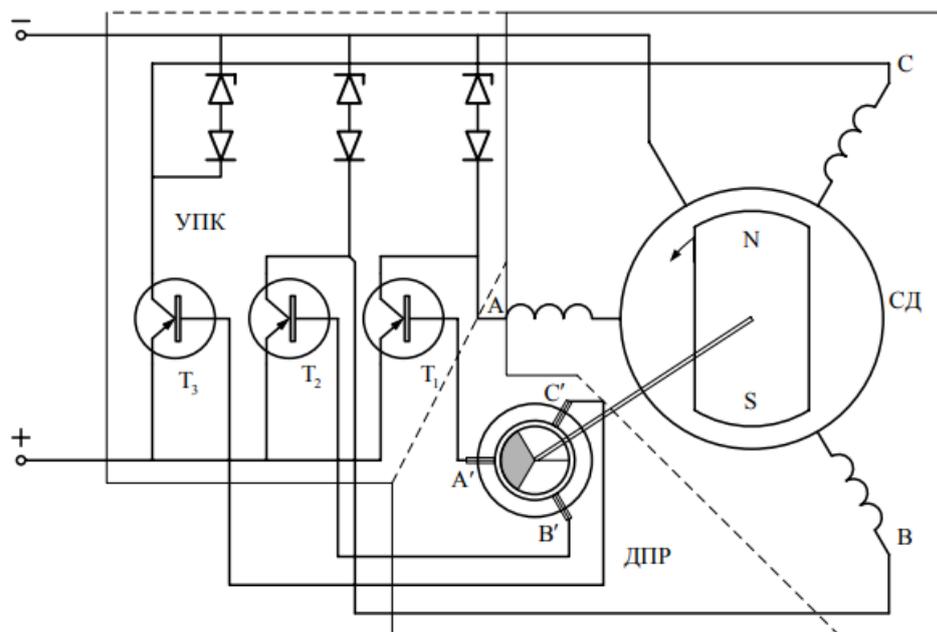
Осылайша, дроссель датчик магниттелген кезде басқару сигналын шығарады, ал трансформатор сигнал беруді тоқтатады.

Қарапайым жағдайда сезімтал элементтердің саны фазалар санына, ал сигнал элементтерінің саны қозғалтқыш полюстерінің жұптарының санына тең.

7.2 Вентильді тұрақты токты қозғалтқыштың жұмыс принципі

ВТТҚ-тың жұмыс принципін бір полюсті коммутациясы бар екі полюсті үш секциялы ВТТҚ мысалында немесе сол сияқты реверсивті емес қоректендірумен қарастыру ыңғайлы. Сұлбада бөлімдерді бөлек қосу қарастырылады. Осыған сәйкес ротор датчигінің сигнал элементтері 120 электрлік градус бұрыштық өлшемімен және синхронды қозғалтқыш полюстерінің осіне перпендикуляр симметрия осі секторлар (тұрақты магнит) түрінде (7.4 сурет) көрсетіледі.

Қозғалтқыш роторы датчигінің роторы айналғанда оның сигнал элементтері кезектесіп синхронды қозғалтқыш статорының тиісті А, В, С фазаларының осьтеріне бағытталған А', В', С' сезімтал элементтеріне әсер етеді. Сигнал элементтерінің қозғалтқыш роторы датчигінің сезімтал элементтері Т₁, Т₂, Т₃ транзисторларын және олармен байланысқан бөлімдерді кезектесіп ауыстыратын басқару сигналдарын шығарады. Сигналдың болуы транзистордың ашық күйіне сәйкес келеді, ал болмауы жабық күйге сәйкес келеді.



7.4 сурет - Бір толқынды коммутациясы бар вентильді тұрақты ток қозғалтқышының сұлбасы

Демек, синхронды қозғалтқыш роторының айналу үдерісінде синхронды қозғалтқыш статор орамасының әрбір бөлімі (фазасы) 120 электрондық градус бұрыштық өлшеміне сәйкес келетін аралықта қорек көзіне қосылады. Осының негізінде транзисторлардың ашық күйінің уақыты бойынша қарастырылатын коммутациясы 120 градустық коммутация деп аталады. Бұл жағдайда транзисторлардың ашық күйінің уақыты коммутация аралығымен сәйкес

келеді, яғни бір-бірінен кейінгі екі коммутация арасындағы уақыт ($\lambda = \alpha_k$). Жалпы жағдайда мұндай сәйкестік жоқ.

Транзисторларды жабылу сәтіндегі асқын кернеуден қорғау үшін қарсы диод пен стабилитрон диоды синхронды қозғалтқыштың статор орамасының әр бөліміне параллель қосылады.

ВТТҚ жұмыс принципі келесідей. Синхронды қозғалтқыш роторының жағдайы 7.4 суретте көрсетілгендей, мұнда А' сезімтал элементі ротор датчигінің сезімтал элементтерінің әсер ету аймағында орналасқан. Т₁ транзисторы ашық, ал Т₂ және Т₃ транзисторлары жабық. Статор орамасының А бөлімі қуат көзіне қосылған және ол арқылы I_a тогы өтеді, бұл ток F_a ЭҚК бөлімінің осіне бағытталған. В және С бөлімдері ажыратылған. I_a тогының СК-тың индуктор өрісімен өзара әрекеттесуі нәтижесінде СК роторының айналуын тудыратын электр магниттік момент пайда болады, сәйкесінше, ҚРД-інің роторы сағат тіліне қарсы. Егер тұрақты магнит өрісі ауа саңылау бойымен синусоидалы түрде таралса, онда айналу моменті:

$$M = C_1 \Phi_0 F_a \sin(90^\circ - \alpha) \quad M = C_m \Phi_0 I_a \cos \alpha, \quad (7.1)$$

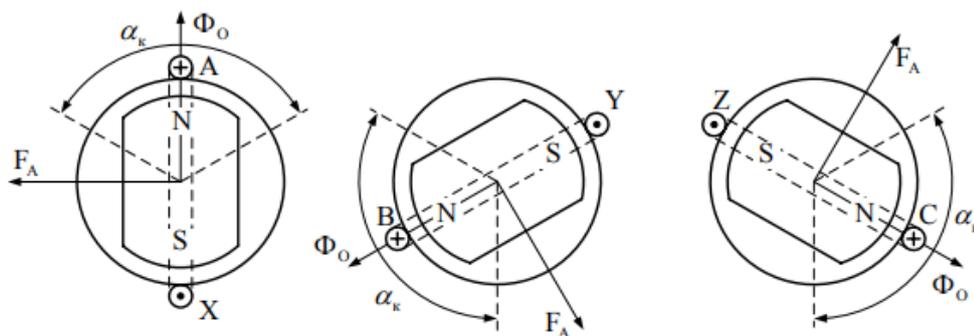
мұндағы Φ_0 – ротор ағыны;

C_1 және C_m – тұрақты коэффициенттер;

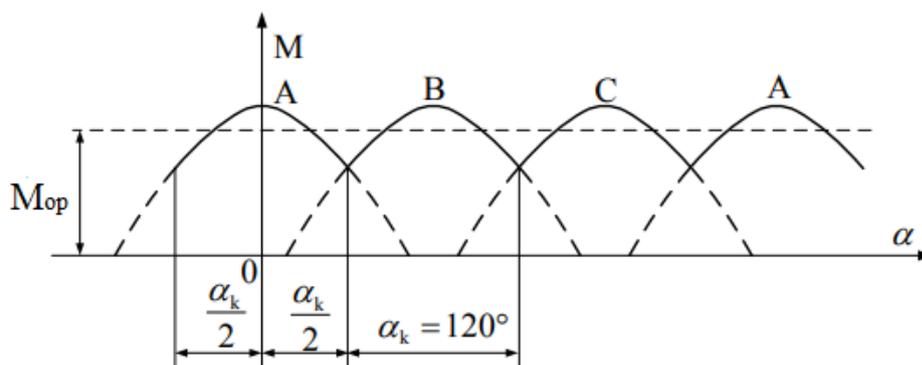
α - А бөлімінің жазықтығынан есептелген ротордың айналу бұрышы.

Ротор $\alpha = \frac{\alpha_k}{2} = 60^\circ$ бұрышқа бұрылғанда А' сезімтал элемент ҚРД-нің сезімтал элементтер әсері аймағынан шығады, Т₁ транзистор жабылады және А бөлімі ажыратылады. Сонымен қатар, Т₂ транзисторын ашатын және В бөлімін қорек көзіне қосатын В' сезімтал элемент СЭ-дегі әсер ету аймағына келіп түседі. Сонымен бірге электр магниттік момент осы бөлім тогы мен тұрақты Φ_0 магнит ағынымен өзара әрекеттесуімен байланысты болады. Роторды $\alpha = \alpha_k + \frac{\alpha_k}{2} = 180^\circ$ бұрышына бұрғаннан кейін келесі коммутация аралығы пайда болады, оның барысында жұмыс бөлімі С бөлімі болады.

Индуктордың орташа жағдайларын қарастырылған коммутация аралығы шегінде бейнелейміз (7.5 сурет) және момент қисығы 7.6 суретте көрсетілген.



7.5 сурет – Индуктордың орташа жағдайы



7.6 сурет – Бейтарап коммутация кезіндегі момент

Қарастырылып отырған жағдайда ротор айналғанда 120 электрондық градус аралықпен F_a ЭҚК-нің тербеліс жасап айналуы орын алатындығына ерекше назар аударайық. ҚРД-нің көмегімен жүзеге асырылатын соңғысының жағдайы бойынша кері байланыстың болуына байланысты СҚ роторының айналуымен синхрондалады. Бөлімнің ауысу жиілігі мен ротордың айналу жиілігі машинаның жұмыс режиміне байланысты реттеледі, ал коммутатор индуктордың магнит ағынының осіне перпендикуляр статордың (зәкір) МҚК бағытын тұрақты ұстап тұрады. ВТТҚ-тың әдеттегі СҚ-тан айырмашылығы онда айналу жиілігі тек қуат жиілігімен анықталады және жұмыс режиміне тәуелді емес.

Жоғарыда сезімтал элементтер СҚ статор орамасының тиісті фазаларының (секцияларының) осьтері бойынша бейтарап коммутация жағдайы қарастырылған. Оларды қозғалтқыш роторының айналуына қарсы θ бұрышына ауыстырған кезде коммутация белсенді, ал айналу артта қалады. Бұл жағдайда ротордың коммутация аралығы бойынша орташа жағдайлары коммутацияланған бөлімдердің жазықтықтарына қатысты сол жақ бұрышқа бұрылады. θ бұрышы тұрақты токтың коллекторлық қозғалтқышындағы геометриялық бейтарап щеткалардың ығысуына сәйкес келеді.

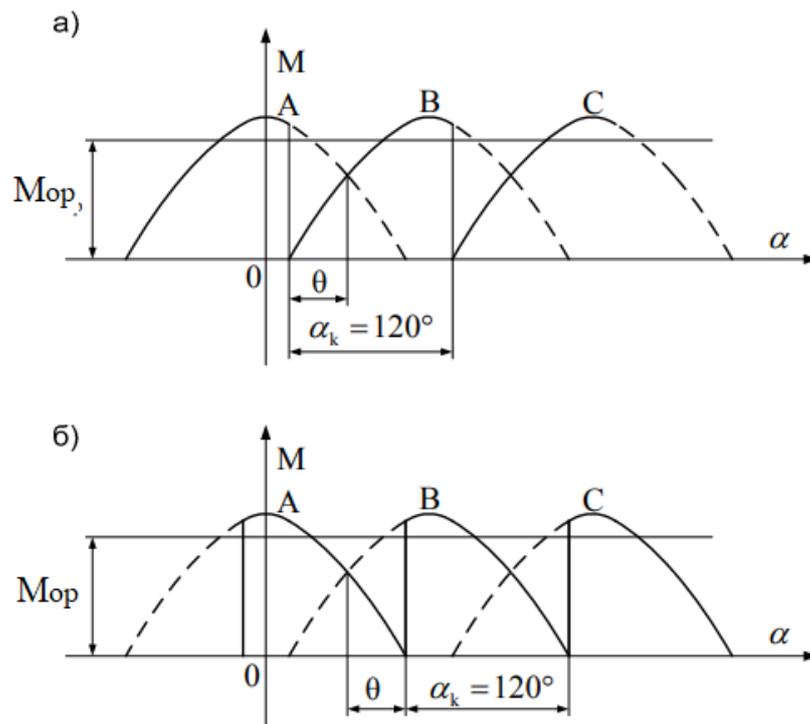
Алдын ала және артта қалған коммутация кезіндегі ВТТҚ-тың моменті:

$$M = C_m \Phi_0 I_0 \cos(\alpha - \theta), \quad (7.1)$$

$$M = C_m \Phi_0 I_0 \cos(\alpha + \theta). \quad (7.2)$$

Қарастырылып отырған жағдай үшін $M = f(\alpha)$ тәуелділігі 7.7, а, б суреттерінде көрсетілген.

ВТТҚ электр магниттік моменттің айтарлықтай пульсациясымен сипатталады. Бұл кемшілікті жою СҚ-тың статор орамасының бөлімдерінің санын көбейту арқылы орындалады. Алайда, бұл коммутатордың сұлбасын қиындатады. Сондықтан аз бөлшектерден (2, 3, 4) тұратын ВТТҚ-тар кеңінен қолданылды.



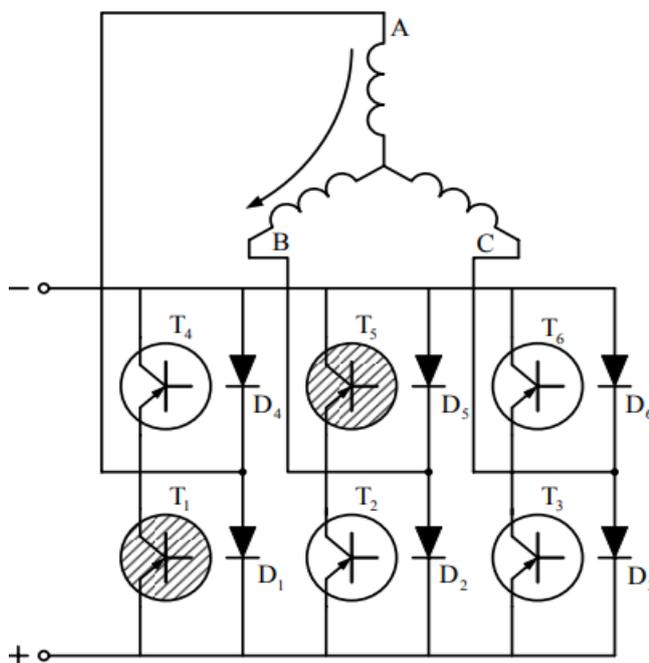
7.7 сурет – Алға озған (а) және қалыс қалған (б) коммутация кезіндегі МОМЕНТ

Жоғарыда қарастырылған секциялардың кезектесіп бөлек қоректенуімен қатар, біржолғы коммутациялық секцияларды бөлек-бірлесіп қосуға мүмкіндік береді. Бұл жағдайда ҚРД-нің сигнал элементі 180 электронды бұрыш өлшемімен орындалады. СҚ роторының айналуы нәтижесінде бір немесе екі сезімтал элементтерін сигнал элементтерімен жабу орындалады, сонымен қатар қозғалтқыш статор орамасының бір немесе екі бөлігі қуат көзіне қосылады. Бұл жағдайда статордың МҚК-і бір немесе екі бөлікпен пайда болады және транзисторлардың әрқайсысы 180 ($\lambda > \alpha$). электрондық градусқа аралықта ашық күйде болады. Сондықтан коммутация 180 градус деп аталады.

7.3 Екі жартылай периодты үш бөліктен тұратын вентильді қозғалтқыш

Бір жартылай периодты коммутациясы бар үш бөліктен тұратын ВТТҚ үш транзистордан тұратын ең қарапайым басқарылатын жартылай өткізгіштік коммутатор жүйесінен тұрады. Алайда, статор орамасын және СҚ-тың толық көлемін пайдалану негізгі мәнге ие болған жағдайда, коммутатордың екі жартылай периодты сұлбасын қолдану қолайлы. Мұндай коммутатор алты $T_1 - T_6$ транзисторлармен көпір сұлбасы бойынша орындалады (7.8 сурет). $D_1 - D_6$ диодтары транзисторлардағы асқын кернеулердің алдын алуға қолданылады, олар қуат көзінен ажыратылғанда статор орамасының өзіндік индукцияланатын ЭҚК-мен орындалады. ҚРД-гі алты сезімтал элементтен тұрады, оның ішінде

A', B', C' сезімтал элементтері T1 – T3 транзисторларын басқарады, ал A'', B'', C'' элементтері T4 – T6 транзисторларын басқарады.



7.8 сурет - Екі жартылай периодты коммутациясы бар үш бөліктен тұратын ВТТҚ

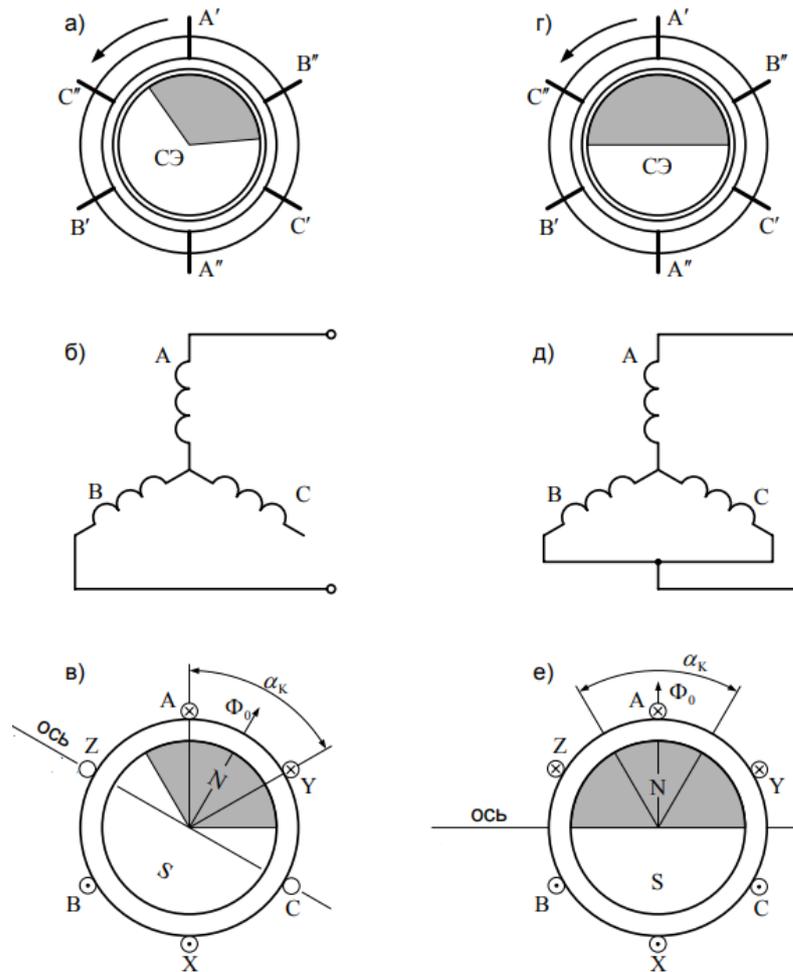
Жоғарыда қарастырылған жағдайдағыдай, ҚРД-гінің сигнал элементтері 120 немесе 180 электронды градустық бұрыштардан тұрады. Осыған сәйкес 120 градустық және 180 градустық коммутацияға ажыратылады.

ҚРД-нің сигнал элементі 120 градустыққа коммутацияланғанда бір уақытта екі сезімтал элементті жабады (7.9, а сурет), нәтижесінде коммутация аралығындағы қуат көзіне тізбектей жалғанған екі бөлім қосылады (7.9, б сурет), ол баламалы ораманы құрады (7.8, в сурет). Егер индуктивтіліктің әсерін елемейтін болсақ, онда бөліктерді (фазаларды) қайта қосу үдерісінде бөліктердегі токтар лезде өзгереді және баламалы ораманың магниттік осі немесе сол сияқты, оның ЭҚК-і 60 электронды бұрыштық аралықпен секіріс жасап айналады. Нақты жағдайда, егер нақты шамаларды (кернеу, ЭҚК және ток) олардың орташа мәндермен алмастырса, талдауға мұндай тәсілді қолдануға болады.

ҚРД-нің сигнал элементі 180 градустыққа коммутацияланғанда бір уақытта үш сезімтал элементті жабады (7.9, г сурет), және үш бөлім бір уақытта қуат көзіне қосылады (7.9, д сурет), ол баламалы ораманы құрайды. Бұл орамның осі 60 электронды бұрыштық аралықпен секіріс жасап қозғалады.

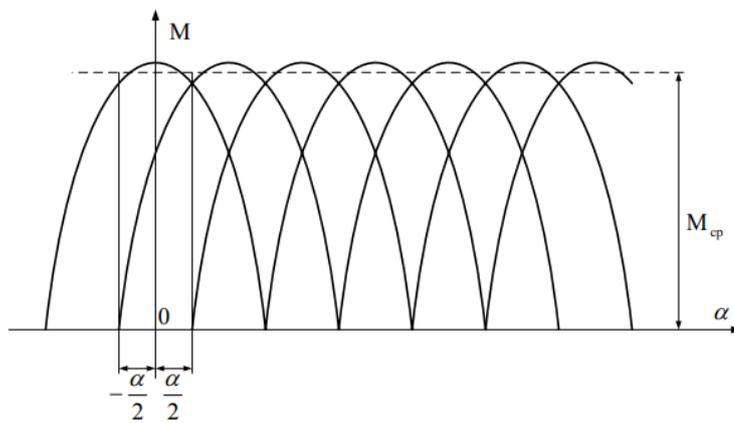
Бақылау сұрақтары

- 1.1 Тұрақты токты вентильді қозғалтқыштың функционалдық сұлбасы.
- 1.2 ВТТҚ-ың құрылымы.
- 1.3 Вентильді тұрақты токты қозғалтқыштың жұмыс принципі.
- 1.4 Индуктордың орташа жағдайы.
- 1.5 Екі жартылай периодты үш бөліктен тұратын вентильді қозғалтқыш түсініктемесі.



7.9 сурет – Вентильді тұрақты токты қозғалтқыштың 120 және 180 градустық коммутациясы

Екі толқынды коммутация кезіндегі момент формуласына баламалы ораманың параметрлері мен тогын қоятын болсақ, коммутация аралығы 120-дан 60-қа дейінгі электронды градусқа төмендеуі, оның орташа мәнін жоғарылатқанда моменттің пульсациясы айтарлықтай төмендетеді (7.10 сурет).



7.10 сурет – 60 гадустық коммутация аралығындағы моменттің өзгерісі

Әдебиеттер тізімі

- 1 Вольдек А.И. Электрические машины. Электрические машины переменного тока. - СПб.: Питер, 2008.
- 2 Электрлі микромашиналар. Оқу құралы (жоғарғы оқу орындарының «Электр энергетикасы» мамандығының студенттеріне арналған)/ П.И. Сагитов, Ю.А. Цыба, Ж.Ж. Тойгожинова. – Алматы: АЭЖБУ, 2016.
- 3 Цыба Ю.А., Алмуратова Н.К. Специальные электрические машины. - Алматы: АУЭС, 2012. - 87 с.
- 4 Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. - М.: Высшая школа, 2006.
- 5 Копылов И.П. Электрические машины. – М.: Высшая школа, Логос, 2000.
- 6 Осин И.Л. Электрические машины автоматических устройств. - М.: «Академия», 2003.
- 7 Лифанов В.А. Электрические машины систем автоматики и бытовой техники: Учебное пособие. - Челябинск: изд. ЮУрГУ, 2006.
- 8 Штеллинг Г. Д., Байссе А. Электрические микромашины. - М.: Энергоатомиздат, 2000.
- 9 Сагитов П.И., Цыба Ю.А. Электрические машины систем автоматики. – Алматы: АИЭС, 2004. - 90 с.

Назира Исенхановна Даримбаева
Жанар Жумакановна Тойгожинова

АВТОМАТТАНДЫРЫЛҒАН ЖҮЙЕЛЕРДІҢ ЭЛЕКТР МАШИНАЛАРЫ

Оқу құралы

Редактор

Жанабаева Е.Б.

Басылымға қол қойылды 03.02.2026
Таралымы 100 дана. Пішімі 60×84 1/16

Баспаханалық қағаз №2
Оқу- бас.ә. 6.8. Тапсырыс № _____
Бағасы 3400 теңге.

«Ғұмарбек Дәукеев атындағы АЭЖБУ» КЕАҚ
Алматы қ., Байтұрсынұлы к., 126/1

«Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс
университеті» коммерциялық емес акционерлік қоғамының
көшірме-көбейту бюросы
Алматы қ., Байтұрсынұлы к., 126/1